การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยโคเอเลสเซอร์โดยใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

นายจิตรภณ โรจน์กิรติการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

TREATMENT OF OIL IN WATER EMULSION BY COALESCER WITH PALM FIBER MEDIA.

MR.JITTAPON ROJKIRATIKARN

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยโคเอเลสเซอร์โดยใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง
โดย	นายจิตรภณ โรจน์กิรติการ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.เจิดศักดิ์ ไชยคุนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…… ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์)

……... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเธียร)

…… อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร. เจิดศักดิ์ ไชยคุนา)

…… กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์)

…… กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. อัมพิรา เจริญแสง)

จิตรภณ โรจน์กิรติการ : การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยโคเอเลสเซอร์โดยใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง. (TREATMENT OF OIL IN WATER EMULSION BY COALESCER WITH PALM FIBER MEDIA.) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร.สุธา ขาวเธียร, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร.เจิดศักดิ์ ไชยคุนา, 123 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำเส้นใยปาล์มซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มาใช้เป็นตัวกลางในกระบวนการโคเอเลสเซอร์เพื่อบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันในรูปอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำด้วยระบบแบบไหลต่อเนื่อง ทำการศึกษาด้วยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ทำจากแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.54 เซนติเมตร และความยาวของถังปฏิกรณ์ 10 เซนติเมตร น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นของน้ำมันที่ปนเปื้อน 500 ถึง 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร และกำหนดความเร็วการไหลผ่านชั้นตัวกลาง 0.1 ถึง 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที และคำนวณประสิทธิภาพจากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันที่เหลือในน้ำเสียหลังผ่านระบบ

ผลการทดลองพบว่าเส้นใยปาล์มมีประสิทธิภาพในการช่วยรวมตัวของเม็ดน้ำมันจากอนุภาคเล็กให้มีอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น ตัวกลางประเภทเส้นใยปาล์มสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำลายความเป็นอิมัลชันของน้ำมันปาล์มและน้ำมันไบโอดีเซลในน้ำเสีย โดยประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำมันในน้ำเสียเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 24 เป็นร้อยละ 80 สำหรับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม และ ร้อยละ 30 เป็นร้อยละ 50 สำหรับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซล และเมื่อความเร็วการไหลสูงขึ้น ระบบจะมีการบำบัดน้ำเสียได้ดีกว่าที่ความเร็วการไหลต่ำ ซึ่งประสิทธิภาพของการบำบัดนี้เกิดจากกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ซึ่งเป็นกระบวนการที่ตัวกลางช่วยในการจับยึดเม็ดน้ำมันไว้ ทำให้เกิดการรวมตัวจากเม็ดน้ำมันที่มีขนาดเล็กกลายเป็นเม็ดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น สามารถเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างน้ำและน้ำมัน เป็นผลให้เกิดการแยกตัวของเม็ดน้ำมัน

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2554 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

5170249021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORDS : COALESCER/ OIL PALM FIBER/ EMULSION

JITTAPON ROJKIRATIKARN : TREATMENT OF OIL IN WATER EMULSION BY COALESCER WITH PALM FIBER MEDIA. ADVISOR: ASSOC. PROF. SUTHA KHAODHIAR, Ph.D, CO-ADVISOR: JIRDSAK TSCHEIKUNA, Ph.D., 123 pp.

The purpose of this research is to investigate the utilization of palm as media in colaescer systems for treating oil emulsion dispersions from wastewater. The coalecer in this experiment was a glass tube 10 cm. in length and 2.54 cm. diameter, packed with palm fiber or resin as coalescing media. This experiments were conducted in continuous flow system.The initial concentration of oil in water emulsion was in the range between 500 to 2000 mg/l. The flow velocity was 0.1 to 0.5 centrimeter per second.

The results showed that the media of coalecer was efficiency to coalescence oil droplet from small to large droplet. Fiber media was efficiency to demulsifier oil palm and biodiesel in wastewater. The rates of demulsification for oil palm emulsion of media coalescer (80%) were higher than non media coalescer (24%). The rates of demulsification for biodiesel emulsion of media coalesce was 50% and non media coalesce was 30%.At higher flow velocity the system efficiency than lower flow velocity.

Department : Environmental Engineering Student's Signature .....
Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature .....
Academic Year : .....2011..... Co-advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ รศ.ดร.สุธา ขาวเธียร ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ที่ได้ให้โอกาสแก่ผู้วิจัยในการทำการทดลอง พร้อมให้ความรู้และคำแนะนำ อันมีประโยชน์ยิ่งต่อแนวทางการศึกษา และการทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.เจิดศักดิ์ ไชยคุนา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์(ร่วม) ที่ได้ให้ความรู้อย่างยิ่งในแง่วิศวกรรมเคมี อันเป็นแนวทางที่ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์ ผศ.ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ และดร.อัมพิรา เจริญแสง ที่ได้กรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนแล้วเสร็จสมบูรณ์ทุกประการ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต แก่ผู้ทำวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ผู้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับโอกาสทางการศึกษาสำหรับข้าพเจ้า

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การสนับสนุนเป็นอย่างดีในทุกๆ เรื่อง แก่ผู้วิจัยจนกระทั่งสำเร็จการศึกษานี้

ผู้วิจัยขอขอบใจเพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และขอขอบคุณบุคลากรที่ได้ร่วมงาน และบุคลากรประจำห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับคำปรึกษาอันล้ำค่า และอุปกรณ์ จนถึงห้องปฏิบัติการในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

\

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 3

1.3 ขอบเขตการวิจัย..... 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5

2.1 ปาล์มน้ำมัน..... 5

2.1.1 กระบวนการผลิตอุตสาหกรรมกรรมปาล์ม..... 7

2.1.1.1 การรับและการเก็บทะลายปาล์มสดที่โรงงาน..... 8

2.1.1.2 การอบปาล์ม..... 8

2.1.1.3 การตีร่วง..... 8

2.1.1.4 การย่อยผลปาล์ม..... 8

2.1.1.5 การสกัดน้ำมัน..... 8

2.1.1.6 การกรองน้ำมันดิบ..... 9

2.1.2 การใช้ประโยชน์จากสิ่งเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์ม..... 9

2.1.2.1 ทะลายปาล์มเปล่า..... 9

2.1.2.2 เส้นใยปาล์ม..... 9

2.1.2.3 กะลาปาล์ม..... 10

2.1.2.4 กากสลัดจ์..... 10

2.2 น้ำมันไบโอดีเซล..... 10

หน้า

2.3 ลักษณะมลภาวะที่เกิดจากน้ำมัน..... 11
2.3.1 น้ำมันที่ละลายน้ำ..... 12
2.3.2 น้ำมันที่เป็นอิมัลชันและไม่มีสารลดแรงตึงผิวผสมอยู่..... 12
2.3.3 น้ำมันที่เป็นอิมัลชันและมีสารลดแรงตึงผิว..... 12
2.4 อิมัลชัน..... 13
2.4.1 การแบ่งประเภทของอิมัลชันของน้ำและน้ำมันตามสถานะ..... 14
2.4.2 การแบ่งประเภทอิมัลชันตามขนาดของเม็ดน้ำมัน..... 15
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดเม็ดน้ำมันในอิมัลชัน..... 15
2.5 การทำลายความเป็นอิมัลชัน..... 16
2.5.1 การทำลายความเป็นอิมัลชันของสารอินทรีย์โดยการไล่ด้วยไอ..... 17
2.5.2 การทำลายความเป็นอิมัลชันด้วยการดูดติดผิว..... 18
2.5.3 การทำลายความเป็นอิมัลชันโดยการรวมตัวเป็นฟล๊อค..... 19
2.5.4 การทำลายความเป็นอิมัลชันโดยโคเอเลสเซอร์..... 19
2.5.5 การทำลายความเป็นอิมัลชันด้วยการปั่นแยก..... 20
2.5.6 การทำลายความเป็นอิมัลชันด้วยอุณหภูมิ..... 20
2.5.7 การทำลายความเป็นอิมัลชันโดยการใช้ไฟฟ้า..... 21
2.6 การทำลายอิมัลชันของน้ำมันโดยการใช้โคเอเลสเซอร์..... 21
2.6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน
ด้วยโคเอเลสเซอร์..... 24
2.6.2 การใช้งานโคเอเลสเซอร์..... 27
2.7 มาตรฐานน้ำทิ้ง..... 27
2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 27
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย..... 31
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย..... 31
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 31
3.1.2 การเตรียมน้ำปนเปื้อนน้ำมัน..... 33
3.1.3 ตัวกลางประเภทเส้นใยปาล์ม..... 34
3.1.4 ตัวกลางประเภทเรซิ่น 35

หน้า

3.1.5 ถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องโคเอเลสเซอร์..... 36
3.1.6 วิธีการวิจัย 38
3.2 วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันที่เหลือ..... 39
3.3 การลดความคลาดเคลื่อนของงานวิจัย..... 40
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์..... 41
4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย..... 41
4.1.1 การทดลองวิเคราะห์ความเป็นอิมัลชันที่อิ่มตัว..... 41
4.1.2 การวิเคราะห์หาระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงที่..... 43
4.2 ศึกษาลักษณะสมบัติของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง..... 44
4.2.1 การทดลองเพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง..... 44
4.2.2 การทดลองเพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง..... 48
4.2.3 การทดลองเพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลของระบบโคเอเลสเซอร์..... 53
4.2.4 การทดลองเพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง..... 57
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 64
4.3.1 การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล..... 64
4.3.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำเสีย..... 65
4.3.3 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง..... 70
4.3.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงประเภทน้ำมันที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์..... 71
4.3.5 ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางเปรียบเทียบกับระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง..... 72
4.3.6 การเปรียบเทียบกับตัวกลางในระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม..... 73
4.3.7 การทดลองโดยใช้เรซิ่นเป็นตัวกลาง..... 73

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ..... 75
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 75
5.2 ข้อเสนอะแนะการวิจัย..... 77
รายการอ้างอิง..... 78
ภาคผนวก..... 82
ภาคผนวก ก 83
ภาคผนวก ข 93
ภาคผนวก ค 103
ภาคผนวก ง 113
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 123

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ลักษณะสมบัติของน้ำมันปาล์มที่ผลิตได้ในประเทศไทย……	5
ตารางที่ 2.2	ปริมาณน้ำมันที่สูญเสียในอุตสาหกรรมปาล์ม.....	7
ตารางที่ 2.3	ธาตุอาหารที่มีในวัสดุเหลือทิ้ง.....	10
ตารางที่ 2.4	สมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม.....	11
ตารางที่ 2.5	การแบ่งวัฏภาคอิมัลชัน.....	14
ตารางที่ 2.6	ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อระบบโคเอเลสเซอร์.....	26
ตารางที่ 3.1	สมบัติของเรซิ่นที่ใช้ในการทดลอง……..	36
ตารางที่ 3.2	ตัวแปรที่ทำการศึกษา และพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดในงานวิจัย.....	39
ตารางที่ 4.1	ขนาดอนุภาคของน้ำเสียสังเคราะห์……	42
ตารางที่ 4.2	ร้อยละการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง.....	46
ตารางที่ 4.3	ร้อยละการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มของระบบโคเอเลสเซอร์ที่มีเส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง…….....	50
ตารางที่ 4.4	ร้อยละการบำบัดของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง.....	55
ตารางที่ 4.5	ร้อยละการบำบัดของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง……	59
ตารางที่ 4.6	การเปลี่ยนแปลงอัตราไหล และเลขเรย์โนลด์ที่ใช้ในการทดลอง.....	65
ตารางที่ 4.7	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดโดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำมันปาล์ม.....	66
ตารางที่ 4.8	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดโดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำมันไบโอดีเซล.....	68
ตารางที่ 4.9	เปรียบเทียบร้อยละการบำบัดระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง.....	71
ตารางที่ 4.10	เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวกลางประเภทต่างๆ……	74

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	กระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมปาล์ม……	6
ภาพที่ 2.2	แบบจำลองสารลดแรงตึงผิว.....	13
ภาพที่ 2.3	อิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ และอิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน.....	14
ภาพที่ 2.4	การทำลายอิมัลชันโดยการไล่ด้วยไอ.....	17
ภาพที่ 2.5	การทำลายอิมัลชันด้วยการดูดติดผิว.....	18
ภาพที่ 2.6	การทำลายอิมัลชันโดยโคเอเลสเซอร์.....	19
ภาพที่ 2.7	ขั้นตอนการทำลายความเป็นอิมัลชันโดยโคเอเลสเซอร์……	21
ภาพที่ 2.8	การเคลื่อนที่สู่ผิวหน้าตัวกลาง……	22
ภาพที่ 2.9	ลักษณะการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำผ่านตัวกลาง……	23
ภาพที่ 2.10	ลักษณะการไหลเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหล……	24
ภาพที่ 3.1	น้ำมันที่ใช้ในการทดลอง.....	33
ภาพที่ 3.2	น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่เป็นอิมัลชัน.....	34
ภาพที่ 3.3	ลักษณะเส้นใยปาล์ม.....	35
ภาพที่ 3.4	เรซิ่นที่ใช้ในงานวิจัย……	35
ภาพที่ 3.5	แผนผังงานวิจัย.....	37
ภาพที่ 3.6	การติดตั้งอุปกรณ์……..	37
ภาพที่ 4.1	ลักษณะน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น	43
ภาพที่ 4.2	ขนาดอนุภาคภายในของเม็ดน้ำมัน……	43
ภาพที่ 4.3	ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม……	45
ภาพที่ 4.4	ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม ที่ความเร็วการไหล 0.1, 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที	46
ภาพที่ 4.5	ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม……	49

หน้า

ภาพที่ 4.6 ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม ที่ความเร็วการไหล 0.1, 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที..... 50
ภาพที่ 4.7 แผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางและมีตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม..... 52
ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซล..... 54
ภาพที่ 4.9 ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซล ที่ความเร็วการไหล 0.1, 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที..... 55
ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซล..... 58
ภาพที่ 4.11 ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซล 0.1, 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที..... 59
ภาพที่ 4.12 แผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางและมีตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซล..... 61
ภาพที่ 4.13 ลักษณะน้ำเสียหลังผ่านระบบโคเอเลสเซอร์..... 63
ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของระบบโคเอเลสเซอร์..... 67
ภาพที่ 4.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของระบบโคเอเลสเซอร์..... 69
ภาพที่ 4.16 แรงที่กระทำต่ออนุภาคเม็ดน้ำมันในระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง... 70

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการผลิตปาล์มถือว่าเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักของประเทศไทย ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจ หนึ่งในห้าชนิด ซึ่งประกอบด้วย ข้าว มันสำปะหลัง ยาง ปาล์ม และอ้อย ในปัจจุบันกระทรวงเกษตรและสหกรณ์มีนโยบายเพิ่มพื้นที่การผลิตปาล์มและปาล์มน้ำมัน จากเดิม 2 ล้านไร่ เป็น 10 ล้านไร่ภายในปี พ.ศ. 2552 (อดุลยรัตน์ ตั้งทวี, 2552) และรัฐบาลได้ตั้งยุทธศาสตร์สำหรับอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มระหว่างปี 2547 ถึง 2572 จะเป็นประเทศที่ผลิตเพื่อการส่งออกน้ำมันปาล์ม ให้ได้ระดับโลกเทียบเท่ากับประเทศอินโดนีเซีย และมาเลเซีย ทั้งนี้เนื่องจากมีการขยายตัวของผู้ใช้พลังงานทดแทนประเภทน้ำมันไบโอดีเซลทั่วโลกและในประเทศ ซึ่งสอดคล้องกับนโยบายการสนับสนุนน้ำมันไบโอดีเซลประเภท B5 ซึ่งเป็นน้ำมันที่ผสมระหว่างน้ำมันดีเซล กับเชื้อเพลิงทดแทนจากพืช ในสัดส่วน น้ำมันดีเซล 95 ส่วนและเชื้อเพลิงทดแทน 5 ส่วน และน้ำมันประเภท B10 คือ น้ำมันที่ผสมระหว่างน้ำมันดีเซลกับ เชื้อเพลิงทดแทนจากพืช ในสัดส่วน น้ำมันดีเซล 90 ส่วนและเชื้อเพลิงทดแทน 10 ส่วน (รติกร อลงกรณ์โชติกุล, 2549)

อุตสาหกรรมการผลิตปาล์มเป็นอุตสาหกรรมที่ทำให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตปาล์ม จำนวน 1,387 กิโลกรัมต่อตันของทะลายปาล์ม วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรนี้ เช่น ทะลายปาล์ม กะลาปาล์ม เศษเส้นใยปาล์มเหลือทิ้ง โดยเป็นเศษเส้นใยปาล์มเหลือทิ้งคิดเป็นร้อยละ 15 ของปาล์มสดทั้งผล หรือ 145 กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์ม ในปัจจุบันมีการนำเส้นใยปาล์มบางส่วนกลับมาใช้ใหม่ เช่น การนำมาเผาเพื่อให้พลังงานความร้อน แต่เศษเส้นใยปาล์มเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตปาล์มนี้ไม่เหมาะสมในการนำมาเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อน เนื่องจากมีค่าความร้อนต่ำ คือ น้อยกว่า 5 เมกกะจูล ต่อ กิโลกรัม จึงมีการนำเศษเส้นใยปาล์มบางส่วนไปใช้เป็นสารอาหารสำหรับการย่อยสลายให้ได้น้ำตาล หรือนำเศษเส้นใยปาล์มไปใช้เป็นอาหารสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้อง ซึ่งหากนำเส้นใยปาล์มไปใช้เป็นอาหารมากเกินไปจะมีผลต่อการย่อยของสัตว์ได้ จึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ใหม่นัก (สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2540)

อุตสาหกรรมปาล์มเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องการน้ำเพื่อใช้ในการผลิตเป็นจำนวนมากซึ่งทำให้อุตสาหกรรมปาล์มเป็นอุตสาหกรรมที่ทำให้เกิดน้ำเสีย เป็นจำนวน 892 กิโลกรัมต่อตันของทะลายปาล์ม ซึ่งน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะเป็นน้ำเสียที่อยู่ในรูปของอิมัลชันที่คงตัว (สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2540)

น้ำมันในรูปอิมัลชันและน้ำมันทั่วไปเป็นสารที่ยากต่อการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ (อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, 2545) แล้วน้ำมันในรูปอิมัลชันยังบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอนได้ยากและหากมีน้ำมันปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติจะทำให้เกิดอันตรายต่อระบบนิเวศและธรรมชาติ เป็นอย่างมากเนื่องจากน้ำมันละลายน้ำได้น้อย ตัวอย่างการปนเปื้อนน้ำมันลงในแหล่งน้ำและก่อให้เกิดมลภาวะทางน้ำ เช่นน้ำมันที่ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำจะก่อให้เกิดเป็นชั้นฟิล์มบนแหล่งน้ำ ซึ่งชั้นฟิล์มจะเป็นตัวปิดกั้นการแพร่ของออกซิเจนลงสู่แหล่งน้ำ ดังนั้น สิ่งมีชีวิตที่ต้องการออกซิเจนจะไม่สามารถดำรงชีพอยู่ได้ ทำให้ขาดความสมดุลของระบบนิเวศ หรือเมื่อน้ำมันปนเปื้อนในแหล่งน้ำ อาจก่อให้เกิดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ไม่ต้องการ (Nuisance Bacteria) เช่น แบคทีเรียกลุ่มสร้างโฟม (Foam Forming) (Metcalf and Eddy, 2004) โดยโฟมที่เกิดจะมีเชื้อแบคทีเรียปนเปื้อนก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์หากสูดดม และเป็นตัวกั้นการแพร่ของออกซิเจนอีกทางหนึ่งด้วย

จากการที่อุตสาหกรรมปาล์มเป็นอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเป็นจำนวนมาก วิธีการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่คงตัวในรูปของอิมัลชันที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีหลากหลายวิธีการ เช่น วิธีการบำบัดโดยใช้กระแสไฟฟ้า วิธีการบำบัดโดยใช้สารเคมี ซึ่งแต่ละวิธีการมีข้อจำกัดในการบำบัดแตกต่างกันออกไป ในการวิจัยนี้ต้องการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยวิธีโคเอเลสเซอร์โดยใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางโดยทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ชนิดของน้ำมันที่ใช้ ความเร็วการไหลผ่านชั้นตัวกลาง ความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสีย เพื่อให้วิธีโคเอเลสเซอร์มีความเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำปนเปื้อนน้ำมันของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง เปรียบเทียบกับตัวกลางที่ใช้ในอุตสาหกรรม

2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำปนเปื้อนน้ำมันประเภทต่างๆ ด้วยวิธีโคเอเลสเซอร์ในถังปฏิกรณ์ แบบต่อเนื่อง

3. ศึกษาประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีชั้นตัวกลาง กับ ระบบโคเอเลสเซอร์ที่มีเส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

4. ศึกษาลักษณะของน้ำปนเปื้อนน้ำมันที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยวิธีโคเอเลสเซอร์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ซึ่งทำ ณ ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย และห้องปฏิบัติการปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous Reactor) โดยควบคุมอุณหภูมิของน้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัย ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส
2. น้ำปนเปื้อนน้ำมันเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจาก น้ำมันประเภทต่างๆ คือ น้ำมันปาล์ม น้ำมันไบโอดีเซล และ น้ำมันเครื่อง โดยทำการเตรียมที่ความเข้มข้นของน้ำมันที่ 700, 1200 และ2000 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ความเร็วการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์คือ 0.1, 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที
4. ตัวกลางที่ใช้เป็นเส้นใยปาล์ม จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม
5. เรซิน เป็นเรซินชนิดรับประจุบวก หาซื้อได้ตามท้องตลาด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อทราบถึงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำปนเปื้อนน้ำมันด้วยวิธีการโคเอเลสเซอร์ โดยใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

2. เพื่อทราบถึง ประเภทของน้ำมัน ความเข้มข้น ความเร็วการไหลที่เหมาะสมในการใช้ออกแบบระบบบำบัดน้ำปนเปื้อนน้ำมันด้วยวิธีการโคเอเลสเซอร์แบบต่อเนื่อง

3. เพื่อทราบถึงประสิทธิภาพที่เปลี่ยนแปลงของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีชั้นตัวกลาง กับระบบโคเอเลสเซอร์ที่มีเส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

4. เป็นแนวทางในการนำสิ่งของเหลือทิ้งทางการเกษตรมาก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

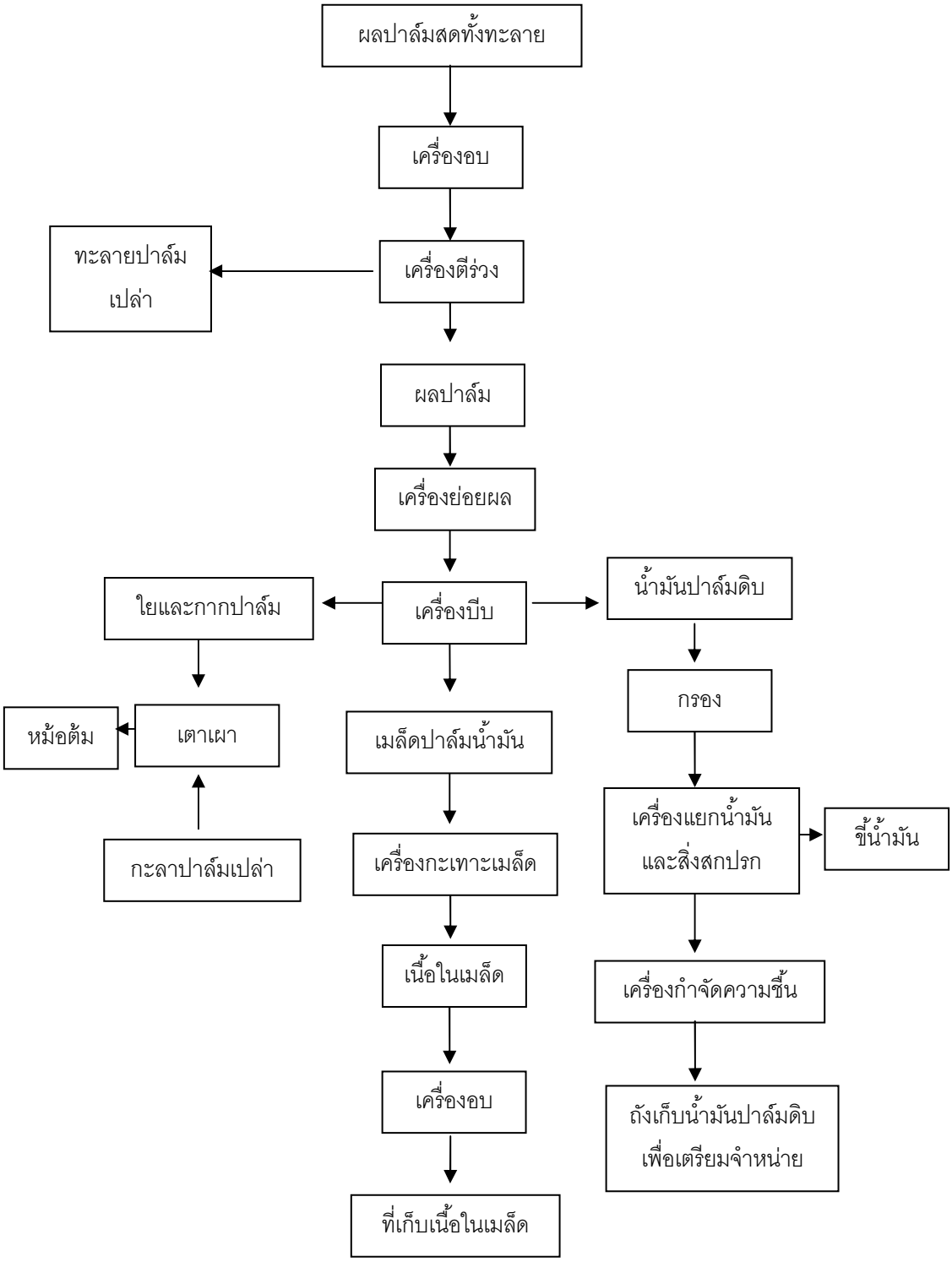
2.1 ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมันจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีการปลูกมากในแถบเส้นศูนย์สูตรโดยประเทศมาเลเซียเป็นประเทศที่มีการปลูกปาล์มน้ำมันมากที่สุดในโลก สำหรับประเทศไทยมีพื้นที่การเพาะปลูกปาล์มที่ให้ผลเก็บเกี่ยวได้ประมาณ 1.94 ล้านไร่ให้ผลผลิตทะลายปาล์มสด 5.2 ล้านตัน ในประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันในภาคใต้ของประเทศไทย ในจังหวัดชุมพร สุราษฎร์ธานี กระบี่ ตรัง สงขลา และสตูล และภาคตะวันออกของประเทศไทย เช่น จังหวัดระยอง ตราด ซึ่งลักษณะสมบัติของน้ำมันปาล์มที่ผลิตได้ในประเทศไทย เป็นดังตารางที่ 2.1 โดยทั่วไปแล้วการปลูกปาล์มน้ำมัน ทะลายปาล์มสดมีน้ำมันปาล์มในเนื้อของเมล็ดปาล์มอยู่ในปริมาณร้อยละ 20-21 โดยกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มนี้ เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำในการผลิตเป็นจำนวนมาก จึงก่อให้เกิดน้ำเสียจำนวนมากด้วย ซึ่งกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมปาล์มเป็นดังภาพที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติของน้ำมันปาล์มที่ผลิตได้ในประเทศไทย

พารามิเตอร์	**หน่วย**	**น้ำมันปาล์มดิบ**
ค่าความหนืด	cSt	24.9
ค่าความหนืด	cP	22.38
จุดวาบไฟ	^{o}C	n/a
จุดขุ่น	^{o}C	12
ความหนาแน่น	กิโลกรัมต่อลิตร	0.899

ที่มา : พนิดา เทพขุน และคณะ, 2549



ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมปาล์ม

ที่มา: สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2540

2.1.1 กระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมปาล์ม

ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน จะทำให้เกิดมวลของวัสดุเหลือทิ้ง และในระหว่างการผลิตจะมีปริมาณน้ำมันที่สูญเสียระหว่างการผลิต ซึ่งน้ำมันที่สูญเสียจะผสมกันกับน้ำ กลายเป็นน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันในรูปของอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำ (Oil in Water, O/W) ลักษณะน้ำมันประเภทอิมัลชันเป็นน้ำมันที่มีความคงตัวสูง ทำการบำบัดด้วยวิธีการบำบัดน้ำเสียตามปกติได้ยาก ปริมาณน้ำมันที่สูญเสียระหว่างการผลิตในอุตสาหกรรมปาล์มเป็นดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณน้ำมันที่สูญเสียในอุตสาหกรรมปาล์ม

สถานะ	**ชนิดของวัสดุ**	**มวลของวัสดุ (กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์ม)**	**ปริมาณน้ำมันที่สูญเสีย (กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์ม)**
ของแข็ง	ทะลายปาล์มเปล่า	230	4.5
	เส้นใย	145	5
	กะลา	60	0
	เมล็ดใน (รวมน้ำมันเมล็ดใน)	60	0
	ตะกอนจากเครื่องเหวี่ยงแยก	0	0
รวม		**495**	**9.5**
ของเหลว	น้ำมันปาล์มดิบ	163	0
	น้ำเสียจากการนึ่งทะลายปาล์มสด	150	0.5
	น้ำเสียหลังจากการเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำสลัดจ์	742	7
รวม		**1055**	**7.5**
ก๊าซ	ไอน้ำ	250	0
รวม		**250**	**0**
การรั่วไหล	ความไม่สม่ำเสมอของกระบวนการผลิต	ขึ้นกับสภาพการผลิตของโรงงาน	
รวม		**1800**	**17**

ซึ่งกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมปาล์มสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.1.1.1 การรับและการเก็บทะลายปาล์มสดที่โรงงาน (Ramp)

เป็นกระบวนการแรกหลังจากเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มสด ซึ่งรถบรรทุกจะรับทะลายปาล์มสดจากแหล่งปลูกปาล์มมาส่งที่โรงสกัดน้ำมันปาล์ม โดยปกติขั้นตอนการรับและการขนส่งไม่ควรจะเกิน 72 ชั่วโมงเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดกรดไขมันอิสระจากเอมไซน์ที่อยู่ในส่วนเปลือก ในกระบวนการรับ และการเก็บจะเกิดน้ำมันปนเปื้อนได้เล็กน้อย

2.1.1.2 การอบปาล์ม (Sterilization)

เป็นการบรรจุทะลายปาล์มสด ในหม้อที่เตรียมไว้สำหรับฆ่าเชื้อโรค โดยการใช้ไอน้ำจากหม้อต้มในการอบ การอบปาล์มนี้จะทำให้เอมไซน์ถูกยับยั้ง เพื่อหยุดปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำมัน นอกจากนี้ ทะลายปาล์มที่ผ่านการอบแล้วเนื้อเยื่อปาล์มจะยุ่ยและง่ายต่อการหีบอัดน้ำมัน

2.1.1.3 การตีร่วง (Bunch Stripping)

เป็นการแยกผลปาล์มและทะลายปาล์มออกจากกัน โดยเครื่องแยก (Rotary drum) จะได้ทะลายปาล์มเปล่าเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยในกระบวนการนี้จะมีการสูญเสียน้ำมันระหว่างการผลิต ประมาณ 4.5 กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์มสด

2.1.1.4 การย่อยผลปาล์ม (Digestion)

ผลปาล์มที่แยกได้จะถูกส่งไปยังเครื่องย่อย (Vertical Steam-Jacketed Drum digesters) เป็นการตีให้ผลปาล์มแตกโดยเติมน้ำร้อนเข้าสู่ระบบเพื่อให้ง่ายต่อการตีผลปาล์มให้แตก ในการย่อยปาล์มนี้จะทำให้เกิดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

2.1.1.5 การสกัดน้ำมัน

น้ำมันส่วนใหญ่จะเกิดจากกระบวนการสกัดน้ำมันนี้ โดยน้ำมันจะเกิดจากส่วนเปลือกของผลปาล์มที่ถูกเครื่องหีบเกลียวอัด ซึ่งน้ำเสียในกระบวนการนี้เป็นน้ำเสียที่มีภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading) สูงและมีลักษณะเป็นอิมัลชัน โดยในส่วนที่เป็นของแข็ง จะประกอบด้วยเมล็ดและเส้นใย ซึ่งจะทำการแยกเมล็ดปาล์มออกจากเส้นใยโดยไซโคลน เมล็ดปาล์มที่แยกได้จะถูกนำเข้าเครื่องกะเทาะ เพื่อแยกเมล็ดใน และกะลาออกจากกัน เมล็ดในปาล์มจะถูกส่งต่อให้โรงงาน

สกัดน้ำมันเมล็ดใน ส่วนเส้นใยและกะลาปาล์มจะนำไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนในหม้อต้ม โดยให้ความร้อนประมาณ 5 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

2.1.1.6 การกรองน้ำมันดิบ

เป็นการแยกน้ำมันจากของผสมที่มีน้ำมันอยู่ โดยเติมน้ำร้อนลงไปในน้ำมันดิบ แล้วผ่านตะแกรงสั่น น้ำมันที่ได้หลังจากการกรองจะมีอนุภาคขนาดเล็ก และน้ำเสียจะอยู่ในลักษณะอิมัลชัน

2.1.2 การใช้ประโยชน์จากสิ่งเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์ม

สิ่งเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์ม สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้บ้างบางส่วน เช่น การนำกะลาปาล์มไปใช้เป็นเชื้อเพลิง หรือ นำไปผลิตถ่านกัมมันต์ การนำสิ่งเหลือทิ้งไปใช้ปรับปรุงคุณภาพของดิน แต่สิ่งเหลือทิ้งเหล่านี้มีคุณค่าทางอาหารสำหรับพืชต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 การนำสิ่งเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์มไปใช้สามารถสรุปได้ดังนี้

2.1.2.1 ทะลายปาล์มเปล่า

ทะลายปาล์มสามารถไปใช้เป็นปุ๋ย และสารปรับสภาพดิน เพื่อเป็นวัสดุคลุมดิน ป้องกันการชะหน้าดิน ช่วยลดการสูญเสียความชื้นของผิวหน้าดิน แต่ในทางปฏิบัติอาจไม่เหมาะสมนัก เนื่องจากทะลายปาล์มมีปริมาตรจำเพาะสูง ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง และทะลายปาล์มมีคุณค่าทางอาหารสำหรับพืชต่ำ

2.1.2.2 เส้นใยปาล์ม

เส้นใยปาล์มมีปริมาณประมาณร้อยละ 15 ของทะลายปาล์ม ซึ่งมีองค์ประกอบในแง่ของการเป็นปุ๋ยต่ำดังตารางที่ 2.3 และเส้นใยปาล์มนี้ เป็นพลังงานเชื้อเพลิงที่ไม่ดีนัก (ค่าความร้อนของเส้นใยแห้ง มีค่าน้อยกว่า 5 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม) จึงมีการนำเส้นใยไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น เช่น การใช้เป็นสารอาหารสำหรับการย่อยสลายให้ได้น้ำตาลและเป็นอาหารสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้อง โดยผสมในปริมาณร้อยละ 10-20 แต่หากปริมาณของเส้นใยปาล์มที่ผสมเป็นอาหารสูง (ร้อยละ 40-60) จะมีผลให้การย่อยของสัตว์เคี้ยวเอื้องลดลง จึงไม่เป็นที่นิยมนัก

2.1.2.3 กะลาปาล์ม

โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมักใช้กะลาปาล์มเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อกำเนิดไอน้ำ ซึ่งค่าความร้อนของกะลาปาล์มประมาณ 17 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และมีบางส่วนที่นำกะลาปาล์มไปใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

2.1.2.4 กากสลัดจ์

กากสลัดจ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมปาล์ม จะใช้กากสลัดจ์เป็นปุ๋ย เช่นเดียวกับทะลายปาล์ม

ตารางที่ 2.3 ธาตุอาหารที่มีในวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์ม

วัสดุเหลือทิ้ง	**ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)**	N*	P*	K*	Mg*	**กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์ม**
ทะลายปาล์มเปล่า	90	8	0.6	24.1	1.8	230
เถ้าทะลายปาล์ม	0	0	17	450	36	4
เส้นใย	20	23	0.1	2	0.4	145
เถ้าเส้นใย	0	0	17	170	40	50
กากสลัดจ์	72	20	8	20	4	30

*กิโลกรัมต่อตันของวัสดุเหลือทิ้ง

2.2 น้ำมันไบโอดีเซล (พนิดา เทพขุน, 2549)

น้ำมันไบโอดีเซลเป็นน้ำมันที่ผลิตได้จากพืช หรือไขมันสัตว์ โดยผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างไขมันให้เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน โดยไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว และสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์

ไบโอดีเซล เป็นสารเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาทางเคมี ระหว่างน้ำมันพืช หรือน้ำมัน/ไขมันสัตว์ กับแอลกอฮอล์ ซึ่งไบโอดีเซลนี้สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงล้วน หรือใช้ผสมกับน้ำมันดีเซล โดยทั่วไปแล้ว ไบโอดีเซลที่ไม่ทำการผสมกับน้ำมันดีเซล มีชื่อเรียกว่า B100 สำหรับไบโอดีเซลที่ผสมกับน้ำมันดีเซล จะเรียกชื่อตามอัตราส่วนโดยปริมาตรของการผสม เช่น เชื้อเพลิงที่มีไบโอดีเซลร้อยละ 20 ผสมกับน้ำมันดีเซลร้อยละ 80 โดยปริมาตร เรียกว่า B20 เป็นต้น ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม สามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ และมีมลพิษต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซล ไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันปาล์มมีสมบัติดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม
ค่าความหนืด	cSt	4.67
ค่าความหนืด	cP	4.09
จุดวาบไฟ	^{o}C	150
จุดขุ่น	^{o}C	12
ความหนาแน่น	กิโลกรัมต่อลิตร	0.877

ที่มา : พนิดา เทพขุน และคณะ, 2549

2.3 ลักษณะมลภาวะที่เกิดจากน้ำมัน

มลภาวะที่เกิดจากน้ำมัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ น้ำมันที่ละลายน้ำ น้ำมันที่เป็นอิมัลชันและไม่มีสารลดแรงตึงผิวผสมอยู่ และน้ำมันที่เป็นอิมัลชันและมีสารลดแรงตึงผิวผสมอยู่ โดยมีรายละเอียดดังนี้ (Aurelle, 1985)

2.3.1 **น้ำมันที่ละลายน้ำ**

การที่น้ำมันมีความสามารถละลายน้ำได้ สมบัติที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลายน้ำขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น

- ความสามารถในการละลายน้ำของน้ำมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อ น้ำหนักโมเลกุลลดลง
- ความสามารถในการระเหย และความสามารถในการละลายของชนิดน้ำมันชนิดเบาจะสามารถละลายน้ำและระเหยได้ดีกว่าน้ำมันชนิดหนัก
- ความสามารถในการละลายน้ำของน้ำมันเพิ่มขึ้นตามค่าความไม่อิ่มตัว
- น้ำมันที่มีค่าโพลาริตีสูง และมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถละลายน้ำได้ดีที่สุด โดยเฉพาะน้ำมันประเภทอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbon) เช่นน้ำมันเบนซินสามารถละลายน้ำได้ถึง 1,650 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งน้ำมันเบนซินนี้เป็นน้ำมันที่พบได้บ่อยว่าละลายอยู่ในน้ำมากที่สุดเนื่องจากมีค่าโพลาริตีสูง

การละลายน้ำของน้ำมันประเภทนี้มักถูกตรวจพบได้ยาก เนื่องจากน้ำมันกับน้ำจะมีลักษณะใสละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ ไม่สามารถแยกได้ด้วยสายตา แต่อาจจะสีและมีกลิ่น

2.3.2 **น้ำมันที่เป็นอิมัลชันและไม่มีสารลดแรงตึงผิวผสมอยู่**

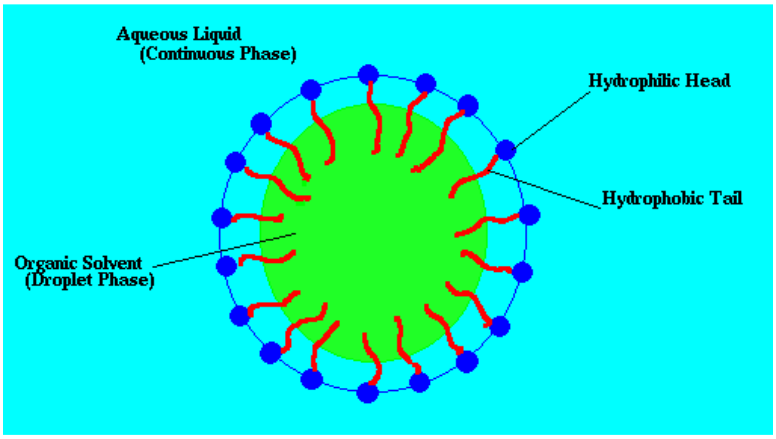
การปนเปื้อนของน้ำมันในอุตสาหกรรมส่วนมาก จะเกิดในรูปอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำ (O/W) เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตอาจทำให้อิมัลชันของน้ำมันแตกตัวจากเม็ดขนาดใหญ่เป็นเม็ดขนาดเล็กลง เช่นเครื่องสูบน้ำ วาล์ว ใบพัด ข้อลด ข้องอ ฯลฯ เหล่านี้ทำให้เม็ดน้ำมันที่กระจายอยู่ในน้ำมีขนาดเล็กลง และมีเสถียรภาพมากขึ้น

2.3.3 **น้ำมันที่เป็นอิมัลชันและมีสารลดแรงตึงผิว**

น้ำมันที่เป็นอิมัลชันและมีสารลดแรงตึงผิวนี้ อาจเรียกได้ว่า อิมัลชันคงตัว (Stabilized emulsions) การที่อิมัลชันประเภทนี้มีความคงตัวค่อนข้างมาก เนื่องจากโมเลกุลมีขนาดเล็กลง คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 5 ไมครอน

สารลดแรงตึงผิว (Surface active agent, Surfactants) เป็นสารที่ประกอบด้วยโมเลกุลที่ไม่สมดุล แบ่งออกเป็น 2 ส่วนๆหนึ่งเป็นส่วนที่ชอบน้ำมัน (Hydrophobic portion) และอีกส่วน

เป็นส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic portion) โดยส่วนที่ชอบน้ำมันจะเกาะติดกับเม็ดน้ำมัน และส่วนที่ชอบน้ำจะเป็นปลายสัมผัสอยู่กับน้ำ ทำให้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวนี้สามารถเกาะติดอยู่กับเม็ดน้ำมันได้



ภาพที่ 2.2 แบบจำลองสารลดแรงตึงผิว

การมีสารลดแรงตึงผิวผสมอยู่ในอิมัลชันจะเกิดปรากฏการณ์ขึ้น 2 ชนิดคือ

1. สารลดแรงตึงผิวทำให้แรงตึงผิวของน้ำมันและน้ำลดลงอย่างมาก หากมีพลังงานภายนอกกระทำต่อเม็ดน้ำมัน จะทำให้มีการแตกตัวได้ง่ายขึ้น พื้นที่สัมผัสของเม็ดน้ำมันกับน้ำมีมากขึ้น เม็ดโมเลกุลของน้ำมันมีขนาดเล็กลง

2. การแตกตัว (Ionization) ในส่วนที่เป็นส่วนชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิว จะทำให้มีประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นที่ผิวของเม็ดน้ำมัน การมีประจุไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อิมัลชันเกิดเสถียรภาพมากขึ้น

ตัวอย่างของน้ำมันชนิดนี้ที่มักพบในอุตสาหกรรม เช่น น้ำมันตัด (Cutting Oil) ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมโลหะต่างๆ ซึ่งน้ำมันตัดนี้ อาจเรียกได้ว่าเป็น น้ำมันละลายน้ำ (Soluble Oil)

2.4 **อิมัลชัน**

อิมัลชัน เกิดจากการผสมของของเหลว ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปที่มีลักษณะสมบัติต่างกัน โดยตัวหนึ่งเป็นอนุภาคคอลลอยด์และอีกตัวหนึ่งเป็นเนื้อเดียวอยู่ร่วมกันแต่ละลายตัวเข้ากันไม่ได้ เป็นเนื้อเดียวทำให้เกิดการแยกวัฏภาค โดยมีชนิดหนึ่งซึ่งเรียกว่าวัฏภาคภายใน (Internal Phase) อยู่กระจายเป็นหยดเล็กๆ (Droplet) ผสมอยู่ในอีกชนิดหนึ่งซึ่งเรียกว่าวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous Phase) ที่มีลักษณะการรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียว การเกิดอิมัลชันสามารถพบเห็นได้

ทั่วไป เช่น การเกิดการแยกวัฏภาคของน้ำและน้ำมัน การเกิดการแยกวัฏภาคของน้ำนมเมื่อถูกตั้งทิ้งไว้ การแบ่งวัฏภาคของอิมัลชันนี้สามารถแบ่งประเภทได้ตามสถานะ หรือ ขนาดของม็ดน้ำมัน ดังนี้

ตารางที่ 2.5 การแบ่งวัฏภาคอิมัลชัน

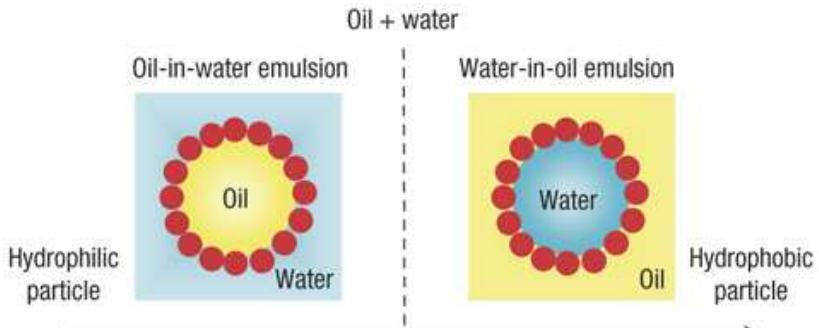
ลักษณะชี้วัด	**วัฏภาคที่** 1	**วัฏภาคที่** 2
รูปร่างของเหลว	ลักษณะเป็นเม็ด	ของเหลวรวมเป็นเนื้อเดียว
การกระจายตัว	กระจาย	ไม่มีการกระจายตัว
การรวมตัว	ไม่รวมตัว	รวมตัวเป็นเนื้อเดียว
วัฏภาค	ภายใน	ภายนอก

2.4.1 การแบ่งประเภทของอิมัลชันของน้ำและน้ำมันตามสถานะ

อิมัลชันของน้ำและน้ำมันสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

1. อิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ (Oil in Water, O/W) คือ น้ำมันเมื่อผสมกับน้ำแล้วเกิดการแยกวัฏภาคกัน โดยการแยกวัฏภาคนี้น้ำมันมีรูปลักษณะเป็นเม็ดเกิดการกระจายตัวใน น้ำที่รวมตัวกันเป็นของเหลว

2. อิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน (Water in Oil, W/O) คือ น้ำเมื่อผสมกับน้ำมันแล้วเกิดการแยกวัฏภาคกัน โดยการแยกวัฏภาคนี้น้ำมีรูปลักษณะเป็นเม็ดเกิดการกระจายตัวใน น้ำมันที่รวมตัวกันเป็นของเหลว ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 อิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ และอิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน

นอกจากการแบ่งอิมัลชันออกเป็น 2 ชนิดดังได้กล่าวมาแล้ว การแบ่งอิมัลชันสามารถแบ่งได้อีกเมื่อมีอิมัลชันมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไปเช่น อิมัลชันของน้ำและน้ำมันแบบ น้ำในน้ำมันในน้ำ (Water-in-oil-in-water, W/O/W) เกิดเมื่อ น้ำที่มีลักษณะเป็นเม็ดผสมในน้ำมันที่มีลักษณะเป็นเม็ดเช่นกัน แต่เม็ดน้ำมันมีลักษณะใหญ่กว่าเม็ดของน้ำ และเกิดเป็นวัฏภาคในน้ำที่มีลักษณะรวมตัวเป็นเนื้อเดียว หรืออิมัลชันของน้ำมันในน้ำในน้ำมัน (Oil-in-water-in-oil, O/W/O) เกิดเมื่อน้ำมันที่มีลักษณะเป็นเม็ดผสมในน้ำที่มีลักษณะเป็นเม็ดเช่นกัน แต่เม็ดน้ำมีลักษณะใหญ่กว่าเม็ดของน้ำมัน และเกิดเป็นวัฏภาคในน้ำมันที่มีลักษณะรวมตัวเป็นเนื้อเดียว\

2.4.2 การแบ่งประเภทอิมัลชันตามขนาดของเม็ดน้ำมัน

เป็นการแบ่งประเภทอิมัลชันตามขนาดเม็ดอิมัลชันของน้ำมัน ที่กระจายอยู่ในน้ำ โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. อิมัลชันปฐมภูมิ (Primary Emulsions) เป็นอิมัลชันที่มีขนาดเม็ดน้ำมันโดยเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดน้ำมันโดยเฉลี่ยมีขนาด 100 ไมครอน ลักษณะทั่วไปของอิมัลชันประเภทนี้จะมีลักษณะใส และแยกวัฏภาคออกจากกันโดยง่ายด้วยการใช้แรงโน้มถ่วง (Gravity)

2. อิมัลชันทุติยภูมิ (Secondary Emulsions) เป็นอิมัลชันที่มีขนาดเม็ดน้ำมันโดยเฉลี่ยเล็ก คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดน้ำมันโดยเฉลี่ยเล็กกว่า 20 ไมครอน ลักษณะโดยทั่วไปจะขาวขุ่นคล้ายนม (Milky) อิมัลชันประเภทนี้มีเสถียรภาพสูง ไม่สามารถแยกวัฏภาคได้โดยการใช้แรงโน้มถ่วง

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดเม็ดน้ำมันในอิมัลชัน

ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดเม็ดน้ำมันในอิมัลชัน ได้แก่ พลังงานที่ทำให้เกิดความปั่นป่วน หากอิมัลชันมีความปั่นป่วนมาก เช่นเกิดการกวน หรือเกิดการตี ทำให้เม็ดน้ำมันแตกตัว ส่งผลให้เม็ดน้ำมันจะลดขนาดจากเม็ดใหญ่เป็นเม็ดที่เล็กลงได้ การที่เม็ดน้ำมันที่เล็กลงส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวน้ำมันและน้ำ (Oil-Water interfacial tension) มากขึ้น น้ำมันจึงเกิดเสถียรภาพกับน้ำ

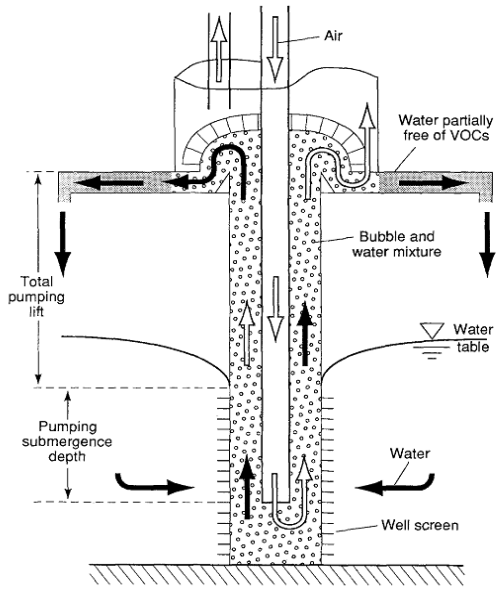
2.5 การทำลายความเป็นอิมัลชัน

อิมัลชัน คือ การผสมของของเหลวตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปอยู่รวมกันแต่เข้ากันเป็นเนื้อเดียวไม่ได้ อันเกิดจาก สมบัติของเหลวที่แตกต่างกัน เช่น การแตกต่างกันของความหนาแน่น การทำลายความเป็นอิมัลชันจึงเป็นการทำให้เกิดการแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจนด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การใช้แรงโน้มถ่วงในการทำให้ของเหลวที่มีความหนาแน่นต่างกัน เกิดการแยกวัฏภาคกัน เช่น การใช้ไฟฟ้าในการช่วยรวมวัฏภาคให้มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวได้และจะสามารถแยกได้ในที่สุด หรือการใช้ตัวกลางในการช่วยแยกวัฏภาคโดยตัวกลางจะทำหน้าที่ช่วยรวมตัวของวัฏภาค ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวและแยกเป็นชั้นเป็นต้น ซึ่งวิธีการทำลายความเป็นอิมัลชันสามารถสรุปได้ดังนี้

2.5.1 **การทำลายอิมัลชันของสารอินทรีย์โดยการไล่ด้วยไอ** (Stripping with vapor)

เป็นการทำลายอิมัลชันของสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยการผ่านก๊าซ ไอ หรืออากาศลงไปในน้ำเสียที่ต้องการบำบัด เมื่อผ่านก๊าซลงไป สารอินทรีย์จะเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลว เป็นก๊าซในรูปของฟองสารอินทรีย์ ซึ่งฟองสารอินทรีย์นี้จะถูกแยกออกจากน้ำเสียบริเวณเหนือบ่อบำบัด ถือเป็นการทำลายความเป็นอิมัลชัน

อย่างไรก็ตามการจะคาดการณ์ถึงประสิทธิภาพของวิธีการทำลายอิมัลชันของสารอินทรีย์โดยการไล่ไอจำเป็นที่จะต้องทำด้วยการปฏิบัติจริง เนื่องจากค่าที่ได้จากการคำนวณยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่มาก และในการปฏิบัติจริงนั้นจะต้องมีการทำถังสำหรับไล่อากาศหลายถัง เนื่องจากการเจือปนของสารอินทรีย์มีมาก ทำให้การบำบัดการปนเปื้อนสารอินทรีย์ด้วยถังเพียงถังเดียวมีประสิทธิภาพต่ำ (Gvirtzman, 1992)



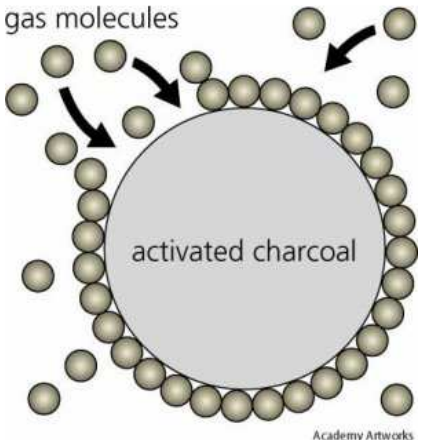
ภาพที่ 2.4 การทำลายอิมัลชันโดยการไล่ด้วยไอ

(ที่มา : http://wiki.lamk.fi/display/rebwp8/In-Well+Air+Stripping)

2.5.2 **การทำลายอิมัลชันด้วยการดูดติดผิว** (Adsorption)

ปฏิกิริยาการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของสารโดยเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง ตัวดูดติดผิว กับตัวถูกดูดติดผิว โมเลกุลที่อยู่ในสถานะของเหลวจะถูกยึดติดอยู่กับผิวหน้าของของแข็งที่เป็นตัวดูดติดผิว อัตราการเกิดการดูดติดผิวจะขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น อุณหภูมิ การมีขั้วหรือมีประจุ ปริมาณพื้นที่ผิวที่ดูดติด โดยยิ่งมีพื้นที่ผิวมากเท่าใด อัตราในการดูดติดผิวยิ่งมีมากขึ้นเท่านั้น สารที่มีพื้นที่ผิวมากที่นิยมใช้คือ ถ่านกัมมันต์

การทำลายอิมัลชันด้วยการดูดติดผิวนี้ นิยมทำเมื่อความเข้มข้นของอิมัลชันต่ำมาก เพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์สูง เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำเพิ่มเติมหลังผ่านการทำลายอิมัลชันแบบการไล่ด้วยไอมาแล้ว การทำลายอิมัลชันด้วยการดูดติดผิวเป็นการทำลายอิมัลชันที่มีราคาแพง และการบำบัดยังทำให้เกิดของเสียอันตราย ซึ่งจะต้องทำการบำบัดด้วยวิธีการบำบัดขั้นสูงต่อไป จึงไม่ได้รับความนิยมเท่าที่ควร



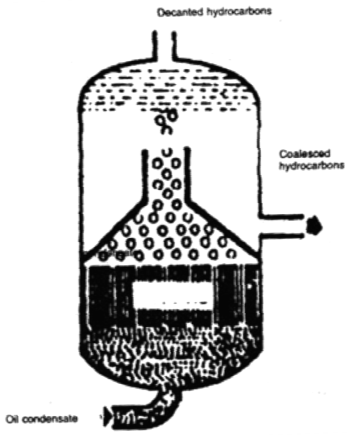
ภาพที่ 2.5 การทำลายอิมัลชันด้วยการดูดติดผิว (Adsorption)

2.5.3 **การทำลายอิมัลชันโดยการรวมตัวเป็นฟล๊อค** (Flocculation)

การทำลายอิมัลชันโดยการรวมตัวเป็นฟล๊อค คือ การทำให้วัฏภาคที่เป็นเม็ดเล็กๆซึ่งกระจายอยู่รวมตัวกันให้มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติใดๆ การทำให้รวมตัวเป็นฟล๊อคนี้ทำได้โดยการเติมสารช่วยให้เกิดฟล๊อค เช่น สารเคมีประเภทต่างๆ ประสิทธิภาพในการรวมตัวกันเป็นฟล๊อคขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น พีเอช ค่าความแรงไอออน ความสามารถในการละลายน้ำ ความตึงผิว ความแตกต่างกันของสถานะ แต่การทำลายอิมัลชันโดยการรวมตัวเป็นฟล๊อค จะทำให้เกิดของเสียอันตรายเช่นเดียวกับ การใช้ถ่านกัมมันต์ จึงต้องทำการบำบัดของเสียอันตรายด้วยวิธีการบำบัดขั้นสูงต่อไป

2.5.4 **การทำลายอิมัลชันโดยโคเอเลสเซอร์** (Coalescer)

การทำลายอิมัลชันโดยโคเอเลสเซอร์ เป็นการใช้ตัวกลาง (Media) ช่วยในการรวบรวมอิมัลชันจากเม็ดขนาดเล็กให้กลายเป็นเม็ดขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อง่ายต่อการแยกตัว การทำลายอิมัลชันโคเอเลสเซอร์ ยังใช้ได้ดีกับอิมัลชันในลักษณะที่เป็นนม (Milky emulsion) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดน้อยกว่า 20 ไมครอน



ภาพที่ 2.6 การทำลายอิมัลชันโดยโคเอเลสเซอร์ (Coalescer)
(ที่มา : http://www.niir.org/books/book/index.html)

หลักการทำงานของการทำลายอิมัลชันโดยโคเอเลสเซอร์ คือ การใช้ตัวกลางในการช่วยรวบรวมอิมัลชันที่เป็นเม็ดเล็กๆ ให้กลายเป็นเม็ดที่ใหญ่ขึ้นเพื่อเอาชนะ แรงยึดเหนี่ยวได้โดยรวดเร็ว เกิดเป็นการแยกชั้นกัน โดยอิมัลชัน หรือน้ำเสียเริ่มต้นจะถูกนำเข้าสู่ระบบทางด้านล่างของถัง

ปฏิกรณ์โคเอเลสเซอร์ เมื่อน้ำเสียผ่านไปยังชั้นตัวกลางซึ่งมีความชอบน้ำมันมากกว่าชอบน้ำ (Oleophilic) ที่บรรจุอยู่ จะทำให้เกิดการรวมตัวของอิมัลชันที่มีขนาดเม็ดเล็ก ให้กลายเป็นอิมัลชันที่มีขนาดเม็ดใหญ่ขึ้น ซึ่งความสามารถในการรวบรวมอิมัลชันเพื่อให้กลายเป็นเม็ดใหญ่ขึ้นกับปัจจัยแวดล้อมหลายประการ เช่น พีเอช อุณหภูมิ ความเข้มข้นของอิมัลชัน ชนิดของอิมัลชันซึ่งการทำลายความเป็นอิมัลชันด้วยโคเอเลสเซอร์นี้ เป็นวิธีที่มีความสะดวกต่อการใช้งาน ไม่ต้องใช้พลังงาน และสารเคมี ซึ่งขั้นตอนการทำลายความเป็นอิมัลชันโดยโคเอเลสเซอร์จะได้อธิบายอย่างละเอียดในหัวข้อ 2.6

2.5.5 **การทำลายอิมัลชันด้วยการปั่นแยก** (Centrifugation Process)

กระบวนการนี้คือการแยกโดยใช้การปั่นทำให้เกิดการแยกชั้น โดยการแยกชั้นจะแบ่งออกเป็น 2 วิธีการ

การทำให้อิมัลชัน เช่น น้ำปนเปื้อนน้ำมัน แยกชั้นกันด้วยความเร็วมักเรียกว่า ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) ซึ่งไฮโดรไซโคลนมักทำการปั่นแยกของแข็งออกจากของเหลว หรือการแยกของเหลว 2 ชนิดออกจากกัน

การทำให้ตัวแยกอิมัลชัน เหวี่ยงด้วยความเร็วเรียกว่า เซนทริฟิวส์ (Centrifuge) โดยบรรจุอิมัลชันลงในภาชนะสำหรับเหวี่ยง จะทำให้เกิดการแยกชั้น

ข้อจำกัดของการทำลายอิมัลชันโดยการใช้แรงเหวี่ยงคือ น้ำเสียและมลทินที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจะต้องมีความแตกต่างกันของความหนาแน่นตั้งแต่ ร้อยละ 3 ขึ้นไป (Altieri, 2010) และการเดินระบบที่มีค่าการดูแลรักษาสูง (Aurelle, 1985) ต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการดูแลระบบ

2.5.6 **การทำลายอิมัลชันด้วยอุณหภูมิ** (Thermal Process)

การทำลายอิมัลชันด้วยอุณหภูมิ เป็นการทำลายความเป็นอิมัลชันสำหรับสารที่มีความแตกต่างกันในด้านจุดเดือด เช่นอิมัลชันของน้ำและน้ำมัน การเพิ่มอุณหภูมิของอิมัลชันจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบ บราวเนี่ยน (Brownian Movement) และเป็นการลดความหนืด รวมถึงลดชั้นฟิล์มที่ห่อหุ้มโมเลกุล ทำให้เกิดการชนกันของอิมัลชันที่มีขนาดเล็กได้ง่ายขึ้น เมื่อเกิดการชนกันจะทำให้ได้เม็ดอิมัลชันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่การทำลายอิมัลชันด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่อิมัลชัน ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน จึงไม่เป็นที่นิยมเท่าที่ควร

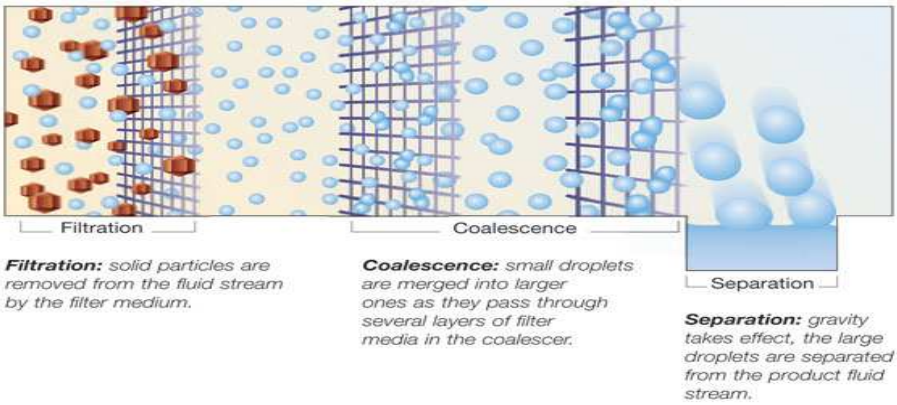
2.5.7 การทำลายความเป็นอิมัลชันโดยการใช้ไฟฟ้า

การทำลายความเป็นอิมัลชันโดยการใช้ไฟฟ้า มีที่มาตามทฤษฎี โมเลกุลที่อยู่ภายในอิมัลชันจะมีประจุ เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ซึ่งดึงดูดโมเลกุลที่มีประจุอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการชนกันและเกิดการรวมตัวกัน สนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเรียงตัวใหม่ของประจุของโมเลกุลในอิมัลชัน มีส่วนทำให้ชั้นฟิล์มมีความยืดเหนี่ยวน้อยลง

การทำลายความเป็นอิมัลชันโดยการใช้ไฟฟ้า โดยปกติไม่กระทำเป็นวิธีการเดี่ยว แต่จะกระทำควบคู่กับวิธีการบำบัดวิธีอื่นๆ เช่น การทำลายความเป็นอิมัลชันโดยใช้ไฟฟ้าควบคู่กับการใช้สารเคมี (Jaruwat, 2010) หรือการทำลายความเป็นอิมัลชันโดยการใช้ไฟฟ้าควบคู่กับการใช้ความร้อน เนื่องจากการใช้ไฟฟ้าควบคู่กับการใช้ความร้อน จะเป็นการลดใช้ความร้อนในการบำบัด ช่วยให้ประหยัดพลังงานมากขึ้นกว่าการใช้ความร้อนในการบำบัดแต่เพียงอย่างเดียว (Bunyen, 2006)

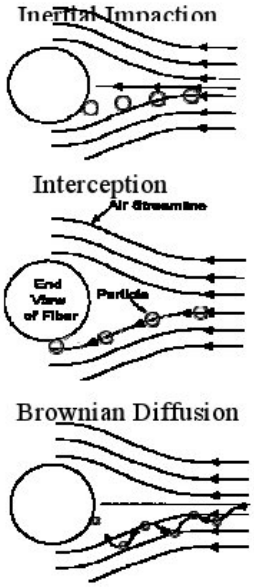
2.6 การทำลายอิมัลชันของน้ำมันในน้ำโดยการใช้โคเอเลสเซอร์

การทำลายอิมัลชันของน้ำมันในน้ำโดยการใช้โคเอเลสเซอร์ สามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ การเคลื่อนที่ของเม็ดน้ำมันสู่ผิวหน้าของตัวกลาง หลังจากนั้นเม็ดน้ำมันจะเกาะติดที่ผิวตัวกลางซึ่งจะเกิดการรวมตัวของเม็ดน้ำมัน หลังจากนั้นเม็ดน้ำมันจะเกิดการแยกตัวออกจากตัวกลางเคลื่อนที่เข้าสู่ส่วนตกตะกอน ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ขั้นตอนการทำลายอิมัลชันโดยโคเอเลสเซอร์

ขั้นตอนที่1 การเคลื่อนที่ของเม็ดน้ำมันสู่ผิวหน้าของตัวกลาง ในขั้นตอนนี้เม็ดน้ำมันขนาดเล็กถูกพาโดยกระแสของน้ำ สู่ผิวหน้าของตัวกลาง ซึ่งมักมีสมบัติชอบน้ำมันแต่ไม่ชอบน้ำ โดยขั้นตอนการเคลื่อนที่สูผิวหน้าของตัวกลาง สามารถแบ่งย่อยตามขนาดของเม็ดน้ำมันได้เป็น 3 ประเภท คือ



ภาพที่ 2.8 การเคลื่อนที่สู่ผิวหน้าตัวกลาง

การเคลื่อนที่ของเม็ดน้ำมันแบบSedimentation หรือ Inertial Impaction เกิดเมื่อเม็ดน้ำมันมีขนาดใหญ่

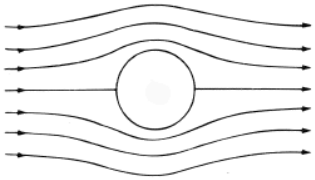
การเคลื่อนที่ของเม็ดน้ำมันแบบ Direct Interception เกิดเมื่อเม็ดน้ำมันมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ

การเคลื่อนที่ของเม็ดน้ำมันแบบDiffusion เป็นการเคลื่อนที่ของเม็ดน้ำมันของเม็ดน้ำมันที่มีขนาดเล็ก คือ ขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน การเคลื่อนที่ของเม็ดน้ำมันจะเกิดคล้ายถูกกระตุ้นด้วยความร้อน คือจะมีการเคลื่อนที่แบบ บราวเนี่ยน

ขั้นตอนที่ 2 การเกาะติดผิวตัวกลาง และการรวมตัวของเม็ดน้ำมันเมื่อน้ำมันเคลื่อนที่มาถึงพื้นผิวของตัวกลาง ตัวกลางที่มีสมบัติชอบน้ำมันแต่ไม่ชอบน้ำจะดูดซับน้ำมันไว้จนเม็ดน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้น

ขั้นตอนที่ 3 การแยกตัวออกจากชั้นตัวกลางของเม็ดน้ำมันสู่ส่วนตกตะกอน เมื่อขนาดของเม็ดน้ำมันมีมากกว่า แรงยึดเหนี่ยว เม็ดน้ำมันจะเกิดการแยกตัวออกจากชั้นตัวกลางขึ้นสู่ส่วนตกตะกอนด้านบน

อนุภาคของเม็ดน้ำมันเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง (Flow past immerse Bodies) จะเกิดแรงที่เรียกว่าแรงลาก (Drag) ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ลักษณะการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำเมื่อผ่านตัวกลาง

ซึ่งความเร็วของแรงลากนี้ จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคเม็ดน้ำมันในหลายรูปแบบ คือแบบลามิน่าร์ (Larmina) แบบทรานซิชั่น (Transition) และแบบปั่นป่วน (Turbulant) สามารถคำนวณ ออกมาได้ในรูปสมการของเรย์โนล์ด (Reynold's number)

$$N_{\mathrm{Re}} = \frac{dV\rho}{(1-\varepsilon)\mu}$$

เมื่อ N_{Re} : เลขเรย์โนลด์

D : เส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)

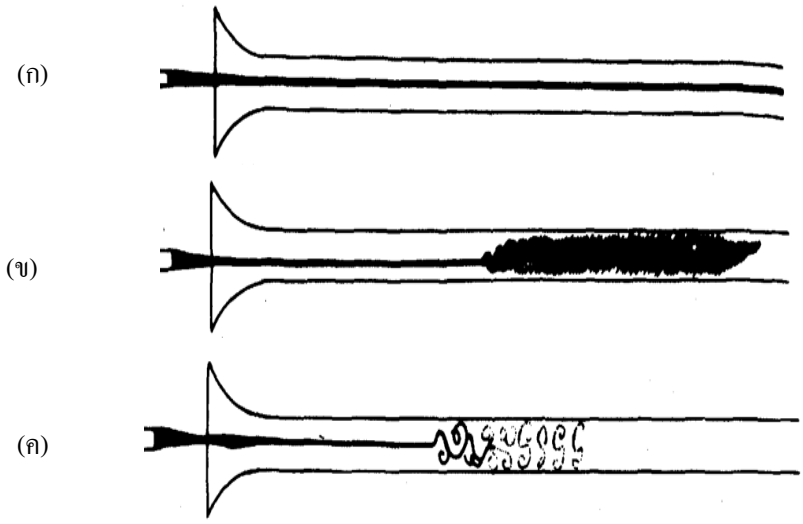
V : ความเร็วการไหล (เมตรต่อวินาที)

ρ : ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

ε : ความเร็วการไหลบนผิว (เมตรต่อวินาที)

μ : ความหนืดของเหลว (พาสคาล)

เมื่อค่าของสมการเรย์โนล์ดเปลี่ยนไปจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความปั่นป่วนด้านหลังตัวกลาง คือเมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดกระแสวนของน้ำด้านหลังตัวกลาง (Vortex) ดังภาพที่ 3.9 (ค)



ภาพที่ 2.10 ลักษณะการไหลที่เกิดเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหล (ก) ลักษณะการเคลื่อนที่แบบราบเรียบ (ข) ลักษณะการเคลื่อนที่แบบทรานซิชั่น (ค) ลักษณะการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน

2.6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยระบบโคเอเลสเซอร์

ตัวกลางที่ใช้ในระบบโคเอเลสเซอร์ สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ ได้ 2 ประเภท คือ

1. โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยป็นตัวกลาง (Fibrous Bed Coalescer) เช่นการใช้เส้นใยโลหะ เส้นใยพลาสติก หรือเส้นใยปาล์ม
2. โคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางแบบเม็ด (Granular Bed Coalescer) เช่น เม็ดแก้ว ก้อนหิน เรซิ่น

การเลือกใช้ตัวกลางของระบบโคเอเลสเซอร์จะต้องเหมาะสมกับลักษณะของน้ำเสียที่ต้องการบำบัด คือ น้ำเสียที่มีตะกอนแขวนลอยปนเปื้อนอยู่สูง ควรใช้ตัวกลางประเภทเม็ด

เนื่องจาก ตะกอนแขวนลอยที่มาก จะทำให้เกิดการอุดตันภายในชั้นตัวกลางได้สูง ตัวกลางที่มีลักษณะเป็นเม็ด จะทำให้การล้างย้อนได้ง่ายกว่า ตัวกลางประเภทเส้นใย

โคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางประเภทเส้นใย เหมาะกับน้ำเสียที่มีตะกอนแขวนลอยน้อย แต่มีความคงตัวของอิมัลชันมาก เนื่องจากตัวกลางประเภทเส้นใยมีความพรุนสูงกว่าแบบเม็ด จึงทำให้การสูญเสียแรงดันน้ำต่ำกว่า (Head Loss) โดยลักษณะของเส้นใย มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อระบบโคเอเลสเซอร์ (วุฒิวัฒ หล่อตระกูล, 2552)

ตัวแปร	ผลกระทบ
ความขรุขระ	ความขรุขระของพื้นผิวเส้นใยที่ใช้เป็นตัวกลางเป็นปัจจัยที่มีผล เนื่องจากแรงที่กระทำที่ผิวของอนุภาคจะมีค่ามากกว่าแรงลอยตัว และการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกถ้าความขรุขระของพื้นผิวไม่เปลี่ยนแปลง
ความสูงของชั้นตัวกลาง	การเพิ่มความสูงของชั้นตัวกลาง ทำให้การรวมตัวกันเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามความสูงของชั้นตัวกลางจะทำให้เกิดความดันลดที่สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกตัวของอนุภาคที่รวมตัวกันแล้ว
ความเร็วการไหล	ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์จะลดลงเมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งความเร็วการไหลผ่านชั้นตัวกลางแบบเส้นใยที่เหมาะสม คือ 0.5-1 เซนติเมตรต่อวินาที
อุณหภูมิ	อุณหภูมิจะมีผลกระทบที่ซับซ้อนต่อประสิทธิภาพของการส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย
ความหนืด	ประสิทธิภาพจะลดลงแบบฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลกับความหนืด
มวลโมเลกุล	ประสิทธิภาพในการรวมตัวกันจะลดลงเมื่อมวลโมเลกุลลดลง
ของแข็งแขวนลอย	ประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ที่ใช้วัสดุพอลิเมอร์จะลดลงเมื่อน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันมีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูง
ขนาดสารกระจาย	ระดับของการรวมตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคที่เข้าใหญ่
สารลดแรงตึงผิว	สารลดแรงตึงผิวจะลดความเร็วการไหลออกของฟิล์มและลดประสิทธิภาพ

2.6.2 การใช้งานโคเอเลสเซอร์

ระบบโคเอเลสเซอร์ในการช่วยบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันมีใช้ในหลายประเทศ เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศฝรั่งเศส ประเทศอังกฤษ และอื่นๆ ซึ่งตัวกลางที่ใช้จะเป็นสารกลุ่มชอบน้ำมันไม่ชอบน้ำ (Oleophilic) เช่น เรซิน (Aurelle, 1985) ดังจะเห็นในหน่วยงาน S.N.E.A. ของประเทศฝรั่งเศส ซึ่งได้ออกแบบไว้ที่ ELF DONGES ขนาดรองรับน้ำเสีย 55 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวน 2 ถัง และ BREST HARBOUR ขนาด 250 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (Aurelle, 1985)

2.7 มาตรฐานน้ำทิ้งของน้ำเสีย

ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13ง ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539 ว่าโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรรมจะต้องปล่อยน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นของน้ำมันไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน15 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Radmila และคณะ (2010) ทำการศึกษาการทำลายความเป็นอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำ โดยใช้เครื่องโคเอเลสเซอร์ที่มีลักษณะแตกต่างกัน 2 ประเภท คือรุ่น 04 และรุ่น H ซึ่งรุ่น 04 ใช้ตัวกลางที่เป็นพอลิยูลิเทนแบบขยาย และพอลิยูริเทนรุ่น H และเปลี่ยนแปลงประเภทน้ำมัน 14 ประเภท จากการทดลองพบว่าระบบโคเอเลสเซอร์ทั้ง 2 ระบบสามารถทำลายความเป็นอิมัลชันได้ แต่เครื่องโคเอเลสเซอร์แบบ H ให้ประสิทธิภาพดีกว่า

Ji และคณะ (2009) ทำการศึกษาการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียโดยการใช้เครื่องโคเอเลสเซอร์แบบไม่ต่อเนื่อง ที่เปลี่ยนแปลงตัวกลาง 2 ประเภทคือ พอลิอะคิโลไนไตร (Polyacrylonitrile) และคือ พอลิอะคิโลไนไตรที่ผ่านการปรับสภาพ (Modified Polyacrylonitrile) ซึ่งการปรับสภาพจะใช้วิธีตัดด้วยแอลกอฮอล์ (Alcoholysis) โดยทำการทดลองกับน้ำมันเครื่องสูตรต่างๆ 3 ชนิด SAE30 SAE50 และน้ำมันเครื่องผสมหลายชนิด (Multigrade engine oil) ผล

การศึกษาพบว่าการปรับสภาพเส้นใยด้วยการตัดด้วยแอลกอฮอล์ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันเครื่องออกจากน้ำเสียได้ดียิ่งขึ้น คือสามารถแยกน้ำมันเครื่องได้ร้อยละ 97

Srinivasan และคณะ (2008) ทำการศึกษาการดูดซับน้ำมันด้วยตัวกลางที่ทำจากผลวอลนัท โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง น้ำมันที่ใช้ 3 ประเภทซึ่งเป็นตัวแทนของประเภทน้ำมัน คือ น้ำมันแร่มาตรฐาน (Standard Mineral Oil) น้ำมันพืชจากคาโนล่า (Canola oil) และน้ำมันตัด (DoALL Bright cutting oil) ผลการทดลองพบว่า การใช้ผลวอลนัทเพื่อทำการดูดซับน้ำมันทั้ง 3 ชนิดได้ 0.56 0.58 และ 0.74 กรัมต่อกรัมตัวดูดซับตามลำดับ ซึ่งจากการศึกษาสรุปได้ว่าตัวกลางที่ทำจากผลวอลนัทสามารถดูดซับน้ำมันได้

Bunyen (2006) ได้ทำการศึกษาการแยกน้ำมันปาล์มดิบที่กระจายตัวอยู่ออกจากน้ำโดยอาศัยตัวกลางแบบเส้นใยช่วยให้เกิดการรวมตัวของหยดน้ำมัน โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำที่ปนเปื้อนด้วยน้ำมันปาล์มดิบ ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำการไหลผ่านตัวกลางชนิดเส้นใยสองชนิด คือ เส้นใยปาล์มและเส้นใยไนล่อน โดยทำการศึกษาที่ความสูงของชั้นตัวกลาง 100 300 และ 500 มิลลิเมตร กำหนดความเร็วการไหลของอิมัลชัน 0.75 1.5 และ 2.25 มิลลิเมตรต่อวินาทีตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า การทำลายความเป็นอิมัลชันของตัวกลางประเภทเส้นใยปาล์มทำได้ดีกว่าตัวกลางประเภทเส้นใยไนล่อน โดยเส้นใยปาล์มสามารถทำลายความเป็นอิมัลชันได้ร้อยละ 45 ส่วนเส้นใยไนล่อนสามารถทำลายความเป็นอิมัลชันได้ร้อยละ 20 ที่ความสูงของหอ 500 มิลลิเมตร และความเร็วการไหลของอิมัลชัน 2.25 มิลลิเมตรต่อวินาที

Shin (2006) ทำการศึกษาการปรับสภาพเส้นใย พอลิสไตรีน แบบขยาย (Expanded Polystyrene) ด้วยการผสมด้วยแก้วขนาดเล็กเพื่อทำเป็นตัวกลางประเภทเส้นใยแก้ว ในการทำลายความเป็นอิมัลชันของน้ำมัน จากการทดลองพบว่าการเติมแก้วลงไปเป็นส่วนผสมจะทำให้ประสิทธิภาพการแยกวัฏภาคของอิมัลชันเพิ่มมากขึ้น แต่การเติมแก้วลงไปก็เป็นการเพิ่มความดันลด (Pressure Drop) ด้วย ผู้ทำการวิจัยได้เสนอส่วนผสมที่เหมาะสมในการทำวิจัยคือ เติมแก้วร้อยละ 4 โดยมวลกับพอลิสไตลีนเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 นาโนเมตร

Li และ Gu (2005) ได้ทำการศึกษาการทำลายความเป็นอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ โดยอาศัยตัวกลางในการช่วยรวมตัว 2 ชนิดคือ ตัวกลางที่มีลักษณะเป็นเส้นใย และตัวกลางที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Granular) ตัวกลางลักษณะเส้นใยที่ใช้คือ พอลิโพไพลีน และไนล่อน ส่วนตัวกลางลักษณะเป็นเม็ดที่ใช้ทำจากพอลิโพไพลีน น้ำมันที่ใช้เป็นน้ำมันดิบ และน้ำมันแร่ นำมาผสมกับน้ำประปา ซึ่งผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลมีผลทำให้การช่วยรวมตัวได้ดีขึ้น แต่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำมัน เมื่อน้ำมันมีความเข้มข้นมากขึ้นจะทำให้การรวมตัวของน้ำมันมีประสิทธิภาพลดลง และประสิทธิภาพการรวมตัวของตัวกลางประเภทเส้นใยทำได้ดีกว่าตัวกลางประเภทเม็ด

Wiwattanangkul (2005) ทำการศึกษาการทำลายความเป็นอิมัลชันของน้ำมันปาล์มในน้ำด้วยสนามไฟฟ้าแรงดันต่ำโดยกำหนดการทดลองเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยน้ำมันโอเลอิน การทดลองทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แรงดัน 2 4 6 และ 10 โวลต์ต่อเซนติเมตรสู่อิมัลชันที่มีโซเดียมซัลเฟตเป็นอิเล็กโทรไลต์ในปริมาณ 0.3 0.6 3.0 15.0 และ 30.0 มิลลิโมลาร์ น้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันความเข้มข้นร้อยละ 2 5 10 และ 15 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลอง เมื่อทำการวัดปริมาณน้ำมันที่หลงเหลือในน้ำเสียขาออกจากระบบเพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบพบว่าสนามไฟฟ้าสามารถทำลายความเป็นอิมัลชันของน้ำมันได้เป็นอย่างดี น้ำมันเกิดการรวมตัวเป็นเม็ดที่ใหญ่ การเพิ่มแรงดันกระแสไฟฟ้ามีผลทำให้อัตราการแยกตัวของน้ำมันเกิดขึ้นได้รวดเร็ว และปริมาณน้ำมันที่กระจายตัวอยู่ทำให้การรวมตัวกันของเม็ดน้ำมันเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบการใช้ไฟฟ้าในการทำลายความเป็นอิมัลชันของน้ำมันทั้ง 2 ชนิดพบว่า กระแสไฟฟ้าทำลายความเป็นอิมัลชันขอบน้ำมันโอเลอินได้ดีกว่าน้ำมันปาล์มเนื่องจาก น้ำมันปาล์มดิบมีของแข็งผสมอยู่ทำให้การรวมตัวของเม็ดน้ำมันทำได้ยากขึ้น

Amaralikit (2004) ทำการศึกษาการแยกน้ำมันปาล์มดิบที่กระจายตัวอยู่ในน้ำโดยใช้ระบบโคเอเลสเซอร์ซึ่งมีตัวกลางในการช่วยรวมตัวของเม็ดน้ำมันที่กระจายอยู่ในน้ำเสีย น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มดิบที่ความเข้มข้น ร้อยละ1 โดยวัดปริมาณน้ำเสียก่อนเข้าระบบ และ หลังจากผ่านจากระบบเพื่อวัดปริมาณน้ำเสียที่หลงเหลือหลังจากการบำบัดโดยระบบโคเอเลสเซอร์ ให้น้ำเสียไหลผ่านตัวกลาง 3 ประเภท คือ เส้นใยปาล์มธรรมชาติ เส้นใยสังเคราะห์ และตัวกลางที่เป็นหิน โดยกำหนดความสูงของชั้นตัวกลางที่ 100 มิลลิเมตร อุณหภูมิที่ทำการศึกษา 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วในการไหลของอิมัลชันเท่ากับ

0.12 0.25 0.4 และ0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งผลการทดลองพบว่าตัวกลางชนิดเส้นใยปาล์มจะมีประสิทธิภาพการรวมตัวของน้ำมันสูงกว่าตัวกลางประเภทเส้นใยสังเคราะห์ และสูงกว่าตัวกลางที่เป็นหิน โดยที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลต่อการทำลายความเป็นอิมัลชัน คือ อุณหภูมิยิ่งสูงอัตราการทำลายความเป็นอิมัลชันจะมีค่าลดลง

Ito และคณะ (2002) ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์จาก น้ำมันเดคเคน (n-Decane oil) ความเข้มข้น 100 ส่วนในล้านส่วน ที่มีสารโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium Dedecyl Sulfate, SDS) ปนเปื้อนอยู่ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 ถึง $1x10^{-4}$ โมลาร์โดยการบำบัดด้วยตัวกลางที่ทำจาก เหล็กผสมนิเกิล (ferro-nickel slag) แบบเส้นใย ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4-8 ไมครอน จากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของSDS มีผลต่อการรวมตัวเป็นเม็ดน้ำมัน

Aurelle (1985) ได้อธิบายเกี่ยวกับความเร็วการไหลของน้ำเสียภายในโคเอเลสเซอร์ ว่าตามปกติการออกแบบโคเอเลสเซอร์ควรมีความเร็วการไหลไม่เกิน 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที หรือ 18 เมตรต่อชั่วโมง

ในอุตสาหกรรมปาล์มเป็นอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มในลักษณะที่เม็ดน้ำมันมีขนาดเล็กในรูปอิมัลชันเป็นจำนวนมาก กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่เป็นอิมัลชันนี้เป็นกระบวนการที่ยากและเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง ปัจจุบันการทำลายความเป็นอิมัลชันนี้มีหลายหลายวิธี เช่น การเติมถ่านกัมมันต์ การใช้ไฟฟ้าในการบำบัด การเติมสารเคมี และวิธีโคเอเลสเซอร์ ซึ่งวิธีโคเอเลสเซอร์นี้เป็นวิธีที่ประหยัดและมีประสิทธิภาพ ดังเห็นได้จากมีงานวิจัยที่บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยโคเอเลสเซอร์เพิ่มขึ้นมากมายหลายวิธีโดยการเปลี่ยนรูปแบบและเปลี่ยนชนิดของตัวกลาง เช่น การเปลี่ยนรูปแบบของถังปฏิกรณ์เป็นแบบ 2 ขั้นตอน หรือเปลี่ยนชนิดของตัวกลางเป็น เส้นใยโลหะ หรือเส้นใยเคฟล่าร์

ของเหลือจากอุตสาหกรรมปาล์ม ประเภทเส้นใยปาล์มมีจำนวนมาก และไม่สามารถทำประโยชน์ได้มากนัก นอกเหนือจากการเผาเพื่อให้ความร้อนแก่หม้อต้ม การนำของเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ให้เป็นประโยชน์ที่สุดจึงเป็นสิ่งที่เหมาะสมในการทำวิจัย

ในงานวิจัยนี้จึงเป็นการประยุกต์ใช้โคเอเลสเซอร์ โดยการนำเส้นใยปาล์มเหลือทิ้งมาใช้เป็นตัวกลางในการเพิ่มขนาดของเม็ดน้ำมันต่างชนิด เปรียบเทียบกับการใช้วัสดุตัวกลางของระบบโคเอเลสเซอร์ตามอุตสาหกรรมเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพ และเป็นแนวทางในการบ่งบอกลักษณะน้ำมันที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริง

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำปนเปื้อนน้ำมัน โดยระบบโคเอเลสเซอร์ซึ่งใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางในการช่วยรวมรวมเม็ดน้ำมัน โดยน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ คือ น้ำประปาผสมกับน้ำมันซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงประเภทน้ำมัน และความเข้มข้นของน้ำมัน และความเร็วการไหลของน้ำมันเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำปนเปื้อนน้ำมันให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. กรวยแยก
2. กระดาษกรอง เบอร์ 40
3. ขวดรูปชมพู่
4. ตู้อบ
5. ถังปฏิกรณ์โคเอเลสเซอร์
6. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
7. แท่นความร้อน (Hot plate)
8. บีกเกอร์
9. ปั๊มสูบน้ำเสีย
10. เส้นใยปาล์ม
11. อ่างน้ำร้อน
12. เครื่องปั่นผสม เพื่อทำให้น้ำมันผสมกับน้ำในรูปของอิมัลชัน

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 37% เกรดระดับ Analytical Reagent Grade ยี่ห้อ CARLO ERBA
2. โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เกรดระดับ Analytical Reagent Grade ยี่ห้อ Anhydrous
3. น้ำประปา (Tap water)
4. น้ำมันไบโอดีเซล จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันปาล์ม
5. น้ำมันปาล์ม เป็นน้ำมันที่หาได้ตามท้องตลาด
6. น้ำมันหล่อลื่น สูตร SAE40 บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)
7. เฮกเซน (C_6H_{14}) Industrial Grade

3.1.2 การเตรียมน้ำปนเปื้อนน้ำมัน

น้ำมันที่ใช้ในการทดลอง 3 ประเภทคือ น้ำมันปาล์ม และน้ำมันไบโอดีเซล และน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งน้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันที่หาได้ตามท้องตลาด น้ำมันไบโอดีเซล เป็นน้ำมันที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตปาล์ม และน้ำมันหล่อลื่นสูตร SAE 40 ที่หาได้ตามท้องตลาดเป็นดังภาพที่ 3.1 (ก) ถึง (ค)

(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 3.1 น้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (ก) น้ำมันปาล์มที่หาได้ตามท้องตลาด (ข) น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม (ค) น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง

การเตรียมน้ำปนเปื้อนน้ำมันในการทดลอง ทำโดยการผสมน้ำมันปาล์ม น้ำมันไบโอดีเซล และน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 40 ความเข้มข้น 700 1200 2000 มิลลิกรัมลงในน้ำประปา 1 ลิตร จากนั้นทำการปั่นน้ำและน้ำมันให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นผสม เป็นระยะเวลาประมาณ 1 นาทีเพื่อให้เกิดอิมัลชัน น้ำเสียที่ได้เป็นดังรูป 3.2 (ก) ถึง (ค)

(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 3.2 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่เป็นอิมัลชัน (ก) น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่เป็นอิมัลชัน (ข) น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่เป็นอิมัลชัน (ค) น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 40

3.1.3 ตัวกลางประเภทเส้นใยปาล์ม

ตัวกลางประเภทเส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางประเภทเส้นใย ซึ่งเส้นใยปาล์มที่ใช้ในการทดลองเป็นเส้นใยที่ได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยมีการคัดเอาเฉพาะเส้นใยปาล์มที่มีลักษณะเป็นเส้น หลังจากการคัดขนาดเส้นใยปาล์ม น้ำเส้นใยปาล์มที่ได้ไปทำให้แห้งด้วยการตากแดดจนแห้ง และนำไปอบให้แห้งสนิทด้วยตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3.3

ภาพที่ 3.3 ลักษณะเส้นใยปาล์ม

3.1.4 ตัวกลางประเภทเรซิ่น

ตัวกลางประเภทเรซิ่น เป็นตัวกลางของระบบโคเอเลสเซอร์ซึ่งเป็นตัวกลางแบบเม็ด (Granular beds) ซึ่งหาซื้อได้ตามท้องตลาด ตัวกลางประเภทเรซิ่นที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นเรซิ่นประเภทแลกเปลี่ยนประจุลบ (Resin Exchange Anions) ซึ่งมีสมบัติดังตารางที่ 3.1 การเตรียมเรซิ่นที่ใช้ในการทดลอง ทำโดยนำเรซิ่นมาทำการล้างเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเกิดจากกระบวนการผลิต ซึ่งลักษณะของเรซิ่นเป็นไปตามภาพที่ 3.4

ภาพที่ 3.4 เรซิ่นที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 3.1 สมบัติของเรซิ่นที่ใช้ในการทดลอง

ประจุบนอนุภาค	Na+
ลักษณะทางกายภาพ	ทรงกลม
หมู่ฟังก์ชัน	หมู่ซัลโฟนิค
น้ำหนัก	850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ความหนาแน่น	1.24
เส้นผ่านศูนย์กลาง	0.6-0.85 มิลลิเมตร
จำกัด pH	0-14
ความพรุน	0.38

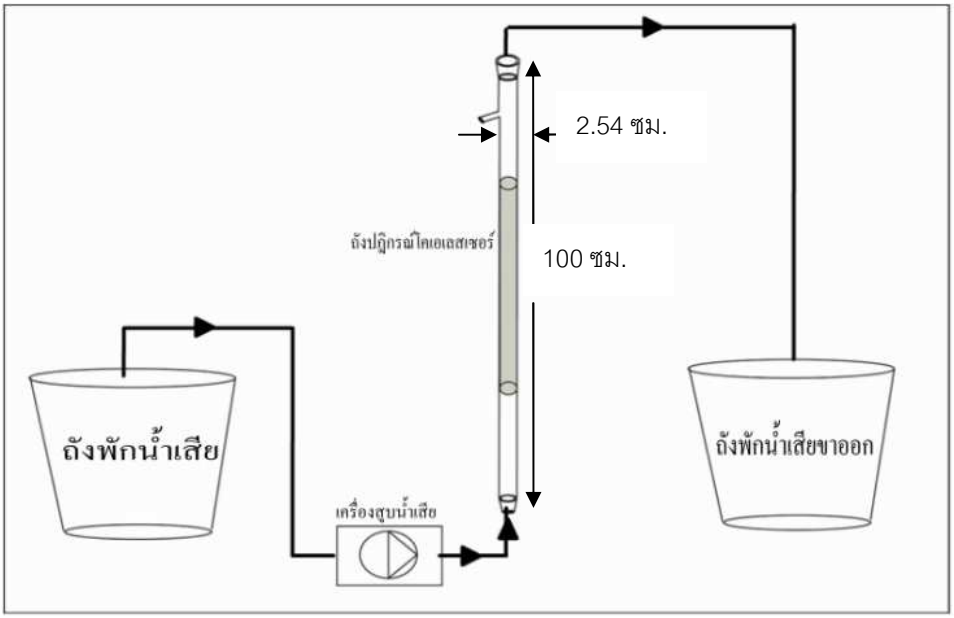
3.1.5 ถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องโคเอเลสเซอร์

ถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องโคเอเลสเซอร์ทำจากแก้ว ซึ่งมีความสูง 100 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของถังปฏิกรณ์มีขนาด 2.54 เซนติเมตร ภายในถังปฏิกรณ์บรรจุเส้นใยปาล์มและเรซิ่น เพื่อเป็นชั้นตัวกลาง เมื่อบรรจุตัวกลางประเภทเส้นใยปาล์มจะได้ชั้นตัวกลางสูง 50 เซนติเมตร ได้น้ำหนักการบรรจุ 7 กรัม และเมื่อบรรจุตัวกลางประเภทเรซิ่นจะได้ชั้นตัวกลางสูง 10 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3.4 ถังพักน้ำเสียและถังพักน้ำเสียขาออกทำจากพลาสติกมีความจุประมาณ 40 ลิตร การดำเนินการวิจัยโดยการสูบน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่ผ่านการทำให้เป็นอิมัลชัน ผ่านเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องโคเอเลสเซอร์ ทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ เพื่อให้ตัวกลางทำลายความเป็นอิมัลชันของน้ำปนเปื้อนน้ำมัน และมีถังสำหรับเก็บน้ำขาทิ้งขาออก

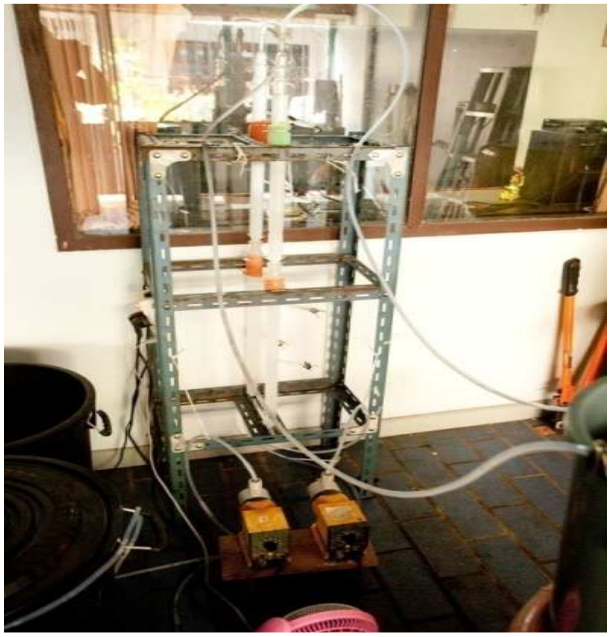
การทำการวิจัยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีชั้นตัวกลางทำโดย สูบน้ำเสียที่ความเร็วการไหลต่างๆ ผ่านถังปฏิกรณ์โคเอเลสเซอร์ โดยทำการต่อระบบดังรูป 3.5

การวิจัยระบบโคเอเลสเซอร์ที่มีเส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางโดยใช้เครื่องโคเอเลสเซอร์ ซึ่งได้บรรจุเส้นใยปาล์มไว้เพื่อเป็นชั้นตัวกลาง ความหนาแน่นของตัวกลางบรรจุประมาณ 3×10^{-4} กรัมต่อตารางมิลลิเมตร ความเร็วการไหลของน้ำเสียคือ 0.1 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที คิดเป็นเวลากักเก็บน้ำเสียของระบบ (Hydraulic Retention Time; HRT) 66 26 และ 13 นาที จากนั้น

วิเคราะห์หาความเข้มข้นของน้ำเสียหลังผ่านระบบโคเอเลสเซอร์ เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบโคเอเลสเซอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของน้ำมัน



ภาพที่ 3.5 แผนผังการวิจัย



ภาพที่ 3.6 การติดตั้งอุปกรณ์

3.1.6 วิธีการวิจัย

การทดลองประกอบด้วย 4 ส่วนได้แก่ การทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสีย ศึกษาการวิเคราะห์ระยะเวลาการเข้าสู่สภาวพคงที่ของน้ำเสีย (Steady Stage) การศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง และการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยใช้เรซิ่นเป็นตัวกลาง

การทดลองส่วนที่ 1 การทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง เป็นการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันชนิดต่างๆ เป็นการทดสอบความคงตัวของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันชนิดต่างๆในรูปของการเป็นอิมัลชันที่คงตัว

การทดลองส่วนที่ 2 การทดลองเพื่อวิเคราะห์ระยะเวลาการเข้าสู่สภาวะคงที่ของน้ำเสีย เป็นการศึกษาระยะเวลาที่เข้าสู่สภาวะคงที่ของระบบโคเอเลสเซอร์ หลังจากที่ได้เดินระบบ

การทดลองส่วนที่ 3 การใช้ระบบโคเอเลสเซอร์ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ที่เป็นอิมัลชัน ที่ความเข้มข้นของน้ำมัน และความเร็วการไหลผ่านชั้นตัวกลางต่างๆ ซึ่งสามารถ แบ่งการทดลองได้ เป็น 2 การทดลองย่อยคือ

การทดลองที่ 3.1 การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในรูปของอิมัลชัน

การทดลองที่ 3.2 การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในรูปของอิมัลชัน

การทดลองส่วนที่ 4 การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เรซิ่นเป็นตัวกลาง ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่เป็นอิมัลชันอิมัลชัน ที่ความเข้มข้นของน้ำมันและความเร็วการไหลผ่านชั้นตัวกลางต่างๆ

การทดลองทั้ง 4 ส่วน การทดลองได้เขียนสรุปไว้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษา และพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดในงานวิจัย

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	**พารามิเตอร์**
ประเภทของน้ำมัน	น้ำมันปาล์ม น้ำมันไบโอดีเซล และน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE40
ความเข้มข้นของน้ำมันที่ใช้	700, 1200 และ 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร
ความเร็วการไหลของน้ำเสีย	0.1 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที
ชนิดตัวกลาง	เส้นใยปาล์ม และ เรซิ่น
ตัวแปรควบคุม	**พารามิเตอร์**
อุณหภูมิ	กำหนดอุณหภูมิของน้ำมันเท่ากับอุณหภูมิห้อง
ความสูงของชั้นตัวกลาง	500 มิลลิเมตร

3.2 วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันที่เหลือ

การวิเคราะห์น้ำมันที่หลงเหลือในน้ำเสียจะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D4281 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำน้ำตัวอย่างมาทำให้เป็นกรดที่พีเอช 2 หรือต่ำกว่า (โดยทั่วไปใช้กรดไฮโดรคลอริก 5 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1 ลิตร)
2. นำตัวอย่างน้ำเสีย 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในกรวยแยก ล้างภาชนะใส่ตัวอย่างน้ำด้วยเฮกเซน 20 มิลลิลิตร แล้วเทลงในกรวยแยก ปิดฝาและเขย่าอย่างแรง 2 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น ปล่อยชั้นน้ำลงในบีกเกอร์ที่สะอาด แล้วจึงปล่อยชั้นเฮกเซนลงในขวดกลั่นที่ชั่งน้ำหนักแล้ว โดยปล่อยให้ไหลผ่านกระดาษกรองที่อยู่บนกรวยที่มี โซเดียมซัลเฟต 1 กรัมหรือมากกว่าใส่อยู่
3. นำน้ำตัวอย่างเดิมสกัดแยกตามวิธีข้างต้นอย่างน้อย 3 ครั้งด้วยเฮกเซน 20 มิลลิลิตรต่อ 1 ครั้ง แล้วเทรวมกันในขวดกลั่นที่ชั่งน้ำหนักแล้วขวดเดิม และล้างกระดาษกรองด้วยเฮกเซน 10-20 มิลลิลิตร

4. ระเหยเฮกเซนจากขวดกลั่นในอ่างน้ำร้อนอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส แล้วนำขวดกลั่นไปเข้าตู้อบ 103 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น 30 นาที และชั่งน้ำหนัก น้ำหนักของขวดน้ำกลั่นที่เพิ่มขึ้น คือ ปริมาณน้ำมันและไขมัน
5. การคำนวณ

$$\text{น้ำมันและไขมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{\text{(A-B) x 1,000}}{\text{ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักของขวดน้ำกลั่นหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)
B คือ น้ำหนักของขวดน้ำกลั่นก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)

3.3 การลดความคลาดเคลื่อนของงานวิจัย

การลดความคลาดเคลื่อนของงานวิจัย ด้วยการดำเนินการซ้ำ การหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต และการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของการวิจัย

การดำเนินการซ้ำ คือ การทำการทดลองด้วยลักษณะเดียวกันมากกว่า 1 รอบโดยในงานวิจัยนี้จะดำเนินการซ้ำ 2 ครั้งเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของงานวิจัย

การหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต คือการหาค่าเฉลี่ยของการดำเนินซ้ำในงานวิจัย เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของงานวิจัย ซึ่งมีสมการคือ

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือการวัดการกระจายของค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวิจัย ซึ่งมีสมการคือ

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \overline{x})^2}$$

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางสำหรับระบบโคเอเลสเซอร์ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน 3 ชนิด โดยทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม น้ำมันไบโอดีเซล และน้ำมันหล่อลื่น สูบน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ถังปฏิกรณ์โคเอเลสเซอร์เพื่อเริ่มต้นการบำบัด การศึกษานี้ ได้ทำการเปลี่ยนแปลงสภาวะของระบบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพที่สถานะต่างๆกัน โดยทำการเปลี่ยนแปลง ความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์ ตั้งแต่ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร จนถึง 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านถังปฏิกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง และความเร็วการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านชั้นตัวกลางประเภทเส้นใยที่ 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที จนถึง 0.5 เซนติเมตรต่อวินาทีโดยเก็บน้ำเสียที่ผ่านออกจากระบบโคเอเลสเซอร์ นำมาวัดความเข้มข้นของน้ำมันที่หลงเหลือในและคำนวณร้อยละของความเข้มข้นของน้ำเสียที่ผ่านออกจากระบบโคเอเลสเซอร์ตามภาคผนวก

4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสีย

4.1.1 การทดลองวิเคราะห์ความเป็นอิมัลชันที่คงตัว

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว ในบทที่ 2 น้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันในลักษณะเป็นอิมัลชันที่คงตัวนั้นจะสามารถบำบัดให้น้ำมันแยกออกจากน้ำเสียได้ยาก ลักษณะอิมัลชันที่คงตัว คือ ขนาดของเม็ดน้ำมันที่มีขนาดเล็กมาก (น้อยกว่า 10 ไมโครเมตร) กระจายตัวอยู่ในน้ำ ในขั้นต้นของการทดลองจำเป็นที่จะต้องทดสอบเพื่อยืนยันความคงตัวของอิมัลชันในน้ำเสียที่จะนำมาทำการทดลอง โดยแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ ลักษณะทางกายภาพที่เห็นได้ และ ขนาดของอนุภาคเม็ดน้ำมันภายใน

การทดลองส่วนนี้เป็นการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำมันที่ใช้ในการทดลองในด้านความเป็นอิมัลชัน โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการปั่นจนเป็นเนื้อเดียวกันดังกล่าวไว้ใน บทที่ 3 จากนั้นจึงทำการสูบน้ำเสียสังเคราะห์เข้าระบบเพื่อทำการบำบัดตามการทดลองอื่นๆต่อไป

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการทดลองนี้ คือ น้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม น้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซล และน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น หลังจากนำมาปั่นรวมกับน้ำจนเป็นอิมัลชันแล้ว จึงนำไปวิเคราะห์เพื่อหาขนาดของอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค ได้ขนาดอนุภาคดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคของน้ำเสียสังเคราะห์

ประเภทของน้ำมัน	ความเข้มข้นน้อยกว่า (มก./ล.)	ขนาดโดยเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	หมายเหตุ
น้ำมันปาล์ม	700	0.79	รวมตัว
	1200	0.49	รวมตัว
	2000	0.6	รวมตัว
น้ำมันไบโอดีเซล	700	0.60	รวมตัว
	1200	0.17	รวมตัว
	2000	0.16	รวมตัว
น้ำมันหล่อลื่น	700	17.28	แยกชั้น
	1200	0.15	แยกชั้น
	2000	0.20	แยกชั้น

จากตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ประเภทน้ำมันปาล์มและน้ำมันไบโอดีเซลเมื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพพบว่ามีลักษณะคล้ายนม (Milky) และเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคพบว่า ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของน้ำเสียสังเคราะห์ทั้งสองประเภทมีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร ซึ่งมีลักษณะเป็นอิมัลชันที่คงตัว สามารถทำการทดลองในขั้นต่อไปได้

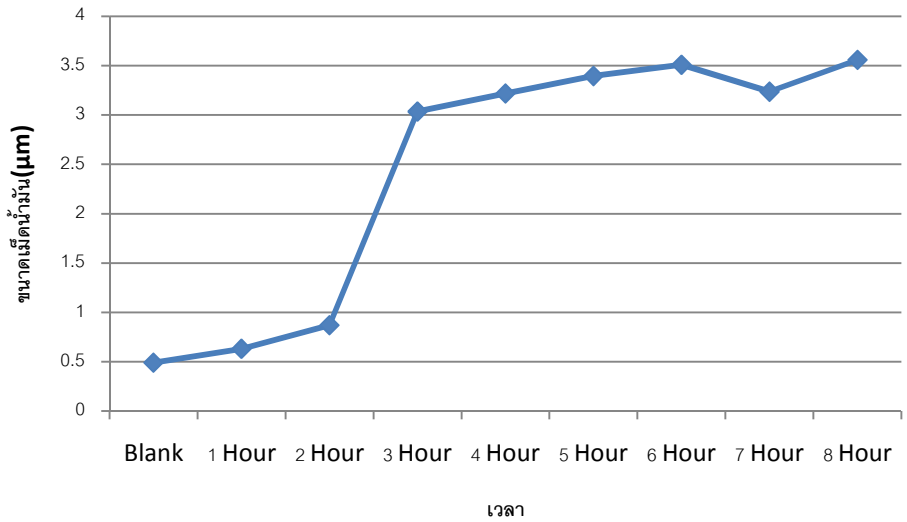
ส่วนน้ำเสียสังเคราะห์ประเภทน้ำมันหล่อลื่น เมื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพพบว่าน้ำมันเกิดการแยกชั้นไม่สามารถรวมตัวกันในลักษณะคล้ายนมดังน้ำมัน 2 ประเภทข้างต้น เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์อนุภาค พบว่าขนาดอนุภาคของน้ำเสียสังเคราะห์ประเภทน้ำมันหล่อลื่นยังมีเม็ดน้ำมันยังมีขนาดไม่คงที่ ไม่เหมาะสมที่จะทำการทดลองบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนอิมัลชัน ดังภาพที่ 4.1

(ก) (ข)

ภาพที่ 4.1 ลักษณะน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 40 ที่ไม่เป็นอิมัลชัน (ก) ด้านข้าง (ข) ด้านบน

4.1.2 การวิเคราะห์หาระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงที่

ขนาดอนุภาคภายในของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 1200 มิลลิกรัมต่อลิตรหลังจากผ่านระบบโคเอเลสเซอร์ที่กำหนดความเร็วการไหลที่ 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที พบว่ามีขนาดใหญ่ขึ้นจากน้อยกว่า 1ไมโครเมตร เมื่อเริ่มต้นระบบโคเอเลสเซอร์ เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมงและขนาดของอนุภาคของเม็ดน้ำมันจะคงตัวอยู่ที่ประมาณ 3 ไมโครเมตร แสดงได้ว่า น้ำมันจะเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State) เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 3 ชั่วโมงได้ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ขนาดของอนุภาคภายในของเม็ดน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้น 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที

จากภาพที่ 4.2 พบว่า เมื่อเวลาในการทดลองผ่านไป ขนาดอนุภาคภายในของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม มีขนาดใหญ่ขึ้น คือ จากขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.49 ไมโครเมตร กลายเป็น ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3.25 ไมโครเมตร

ซึ่งทำให้ทราบได้ว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง เกิดจากการรวมตัวกันเป็นอนุภาคของเม็ดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

4.2 ศึกษาลักษณะสมบัติของระบบโคเอเลสเซอร์

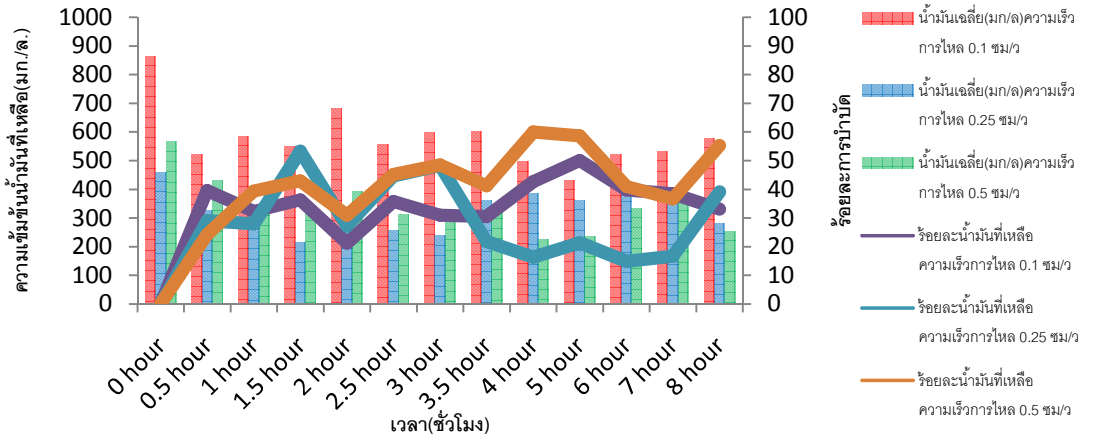
การทดลอง ประกอบด้วย 4 การทดลอง ได้แก่ การทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม และน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซล ด้วยระบบโคเอเลสเซอร์แบบมีตัวกลาง และไม่มีตัวกลาง โดยมีผลการทดลองดังนี้

4.2.1 การทดลองเพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม ของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง

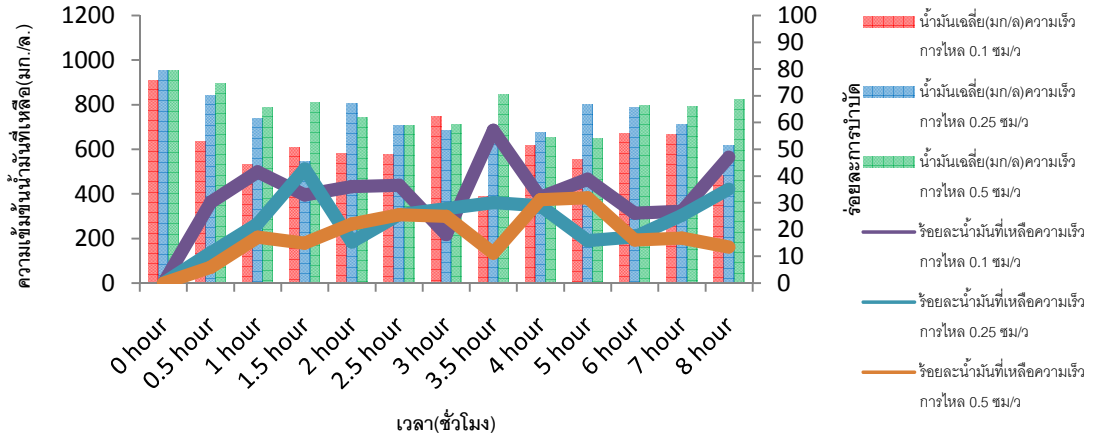
การทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบที่ไม่มีตัวกลาง ซึ่งการรวมตัวกันของน้ำมันนั้นจะเกิดจากผลของแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคของเม็ดน้ำมันในขณะที่น้ำเสียเคลื่อนที่ผ่านระบบโคเอเลสเซอร์

ภาพที่ 4.3 แสดงร้อยละการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มด้วยโคเอเลสเซอร์ชนิดที่ไม่มีตัวกลาง ที่ความเข้มข้นน้อยกว่า ความเร็วการไหลต่างๆ ตลอดช่วงเวลาการทดลองและร้อยละการกำจัดที่ความเข้มข้นและความเร็วการไหลต่างๆ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นการนำความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียขาออกจากระบบตั้งแต่ชั่วโมงที่ 3-8 มาหาค่าเฉลี่ย

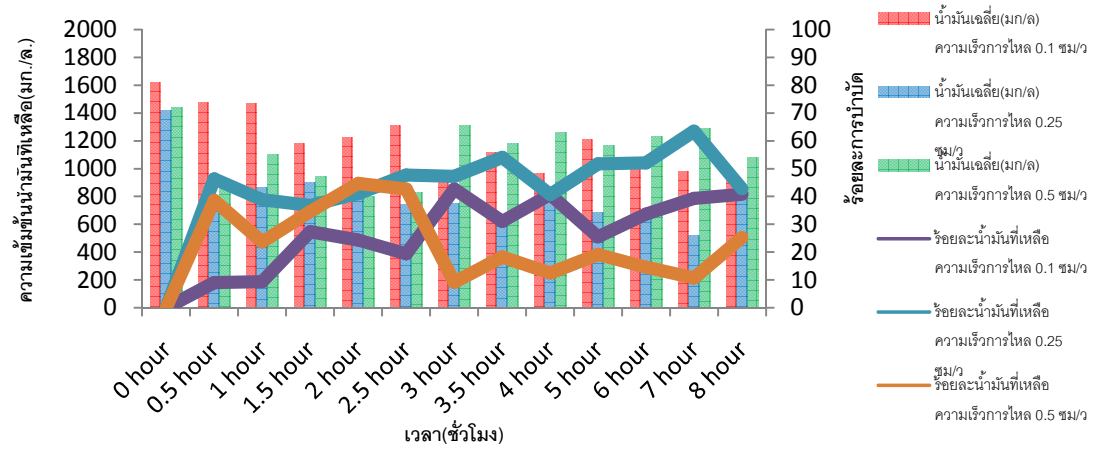
(ก)



(ข)



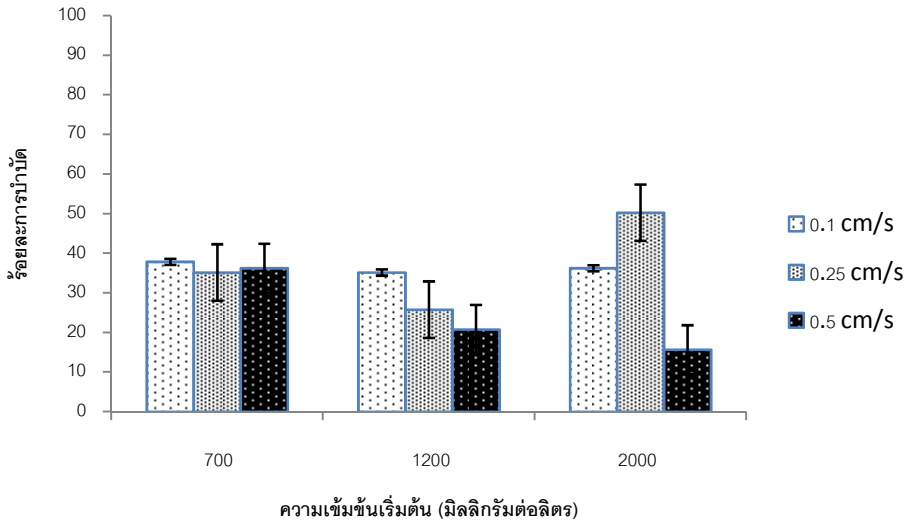
(ค)



ภาพที่ 4.3 ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเร็วการไหล 0.1 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที (ก) ความเข้มข้นน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข) ความเข้มข้นน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค) ความเข้มข้นน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.2 ร้อยละการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง

ความเข้มข้นน้อยกว่า(มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเร็วการไหล (เซนติเมตรต่อวินาที)	ร้อยละการบำบัด	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
700	0.1	37	7.07
	0.25	35	13.45
	0.5	36	6.34
1200	0.1	35	13.45
	0.25	25	6.95
	0.5	20	8.47
2000	0.1	36	6.34
	0.25	50	7.65
	0.5	15	5.61



ภาพที่ 4.4 ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเร็วการไหล 0.1 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที

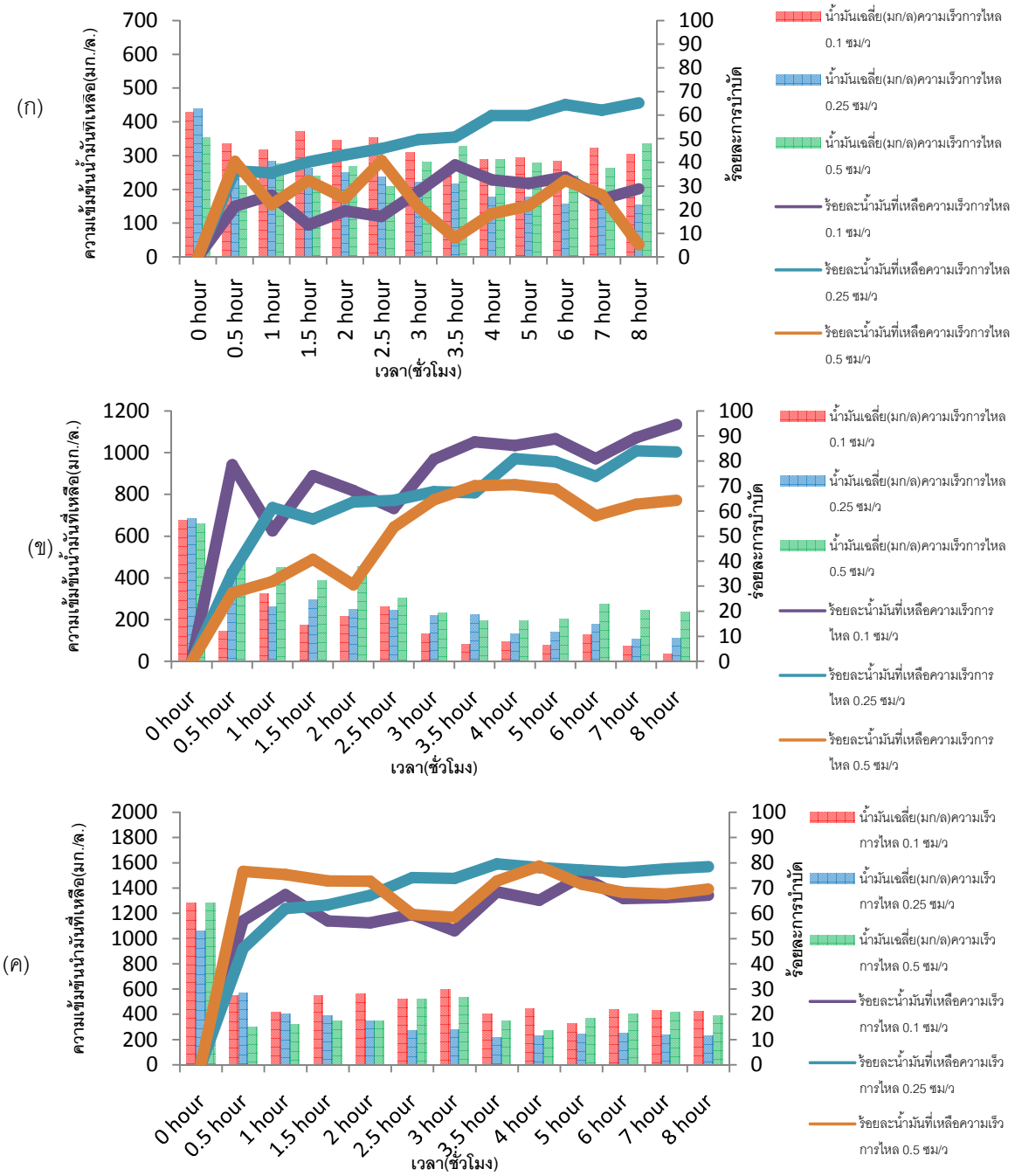
จากภาพที่ 4.3 เป็นแผนภูมิแสดงความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มที่หลงเหลืออยู่ในน้ำเสียขาออก และ ร้อยละการบำบัดของระบบโคเอลเสเซอร์ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ไม่มีตัวกลางโดยทำการเปลี่ยนแปลงที่ความเข้มข้นและความเร็วการไหลต่างๆ ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นน้ำมันมากจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดในรูปของร้อยละการบำบัดได้มากกว่าที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า ที่ความเข้มข้นน้อยกว่าน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วการไหลที่สูงที่สุดจะทำให้ร้อยละการบำบัดน้ำมันลดลงมากที่สุด คือ ร้อยละ 55 ในขณะที่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นเป็นในช่วงน้อยกว่า 1200 จากการทดลองพบว่าร้อยละของการบำบัดน้ำเสียของแต่ละความเร็วการไหลใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 30 และที่ความเข้มข้นน้อยกว่าน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วการไหลที่สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ดีที่สุดคือ 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที

ความเร็วการไหลที่สูงขึ้นจากความเร็วการไหลต่ำเป็นความเร็วการไหลปานกลางทำให้เวลาในการกักเก็บน้ำเสียลดลง เมื่อเวลาในการกักเก็บน้ำเสียลดลงอนุภาคของเม็ดน้ำมันก็มีโอกาสที่จะชนกันได้น้อยกว่าที่เวลากักเก็บน้ำเสียมากกว่า และที่ความเร็วการไหลสูงจะทำให้เกิดแรงเฉือน และเกิดความปั่นป่วนขึ้นภายในถังปฏิกรณ์โคเอเลสเซอร์ คือเมื่ออนุภาคของเม็ดน้ำมันสามารถชนกันและรวมตัวกันได้แล้ว จะเกิดความปั่นป่วนที่ทำให้เม็ดน้ำมันแตกตัวกลายเป็นอนุภาคที่เล็กลงอีกครั้ง ประสิทธิภาพในการบำบัดจึงลดลงกว่าที่ความเร็วการไหลปานกลาง

เมื่อเปรียบเทียบในด้านของการกำจัดในรูปของความเข้มข้นของน้ำมันที่หลงเหลืออยู่ในน้ำเสียขาออก พบว่า ที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดน้ำมันออกได้โดยเฉลี่ย 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดน้ำมันออกได้เฉลี่ย 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าจะสามารถกำจัดน้ำมันได้เฉลี่ย 500 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งการที่ปริมาณน้ำมันที่ถูกกำจัดในรูปของความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัมต่อลิตร) มีมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันมีมากขึ้น เนื่องจาก การเพิ่มปริมาณน้ำมันทำให้โอกาสในการชนตัวของอนุภาคเม็ดน้ำมันที่ได้กระจายอยู่ในอิมัลชันมีมากขึ้นจึงเป็นผลให้เกิดการจับตัวกันของอนุภาคน้ำมันและลอยตัวเข้าสู่ส่วนตกตะกอนที่เตรียมไว้ด้านบนของถังปฏิกรณ์มากขึ้น ความเข้มข้นของน้ำมันเมื่อวิเคราะห์ที่น้ำเสียขาออกจึงลดลง

4.2.2 การทดลองเพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม ของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางของระบบโคเอเลสเซอร์ ซึ่งตัวกลางนี้ จะทำหน้าที่เกาะยึดอนุภาคน้ำมันที่ผ่านมา ทำให้อนุภาคน้ำมันเกิดการชนกันมากขึ้น ซึ่งการชนกันนี้เองทำให้อนุภาคน้ำมันสามารถรวมตัวกัน จากอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กให้เป็นอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นและสามารถแยกอนุภาคออกจากน้ำเสียได้ ซึ่งในการทำการทดลองได้ปรับเปลี่ยนความเข้มข้น และความเร็วการไหลของน้ำเสีย ซึ่งผลการทดลองเป็นดังภาพที่ 4.5

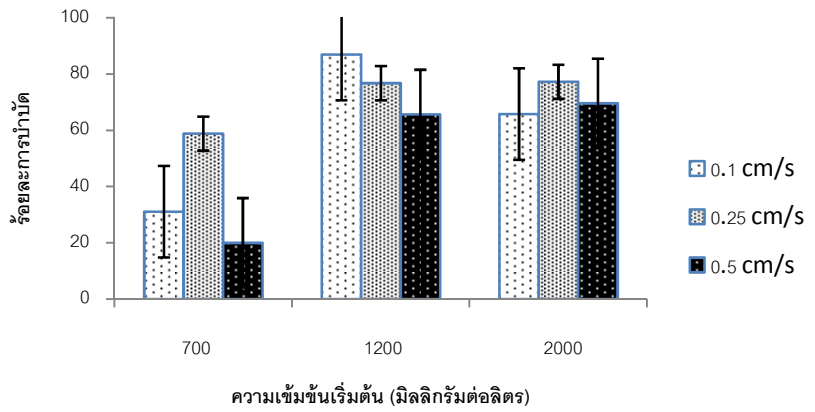


ภาพที่ 4.5 ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเร็วการไหล 0.1 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที (ก) ความเข้มข้นน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข) ความเข้มข้นน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค) ความเข้มข้นน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ภาพที่ 4.5 แสดงร้อยละการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มด้วยโคเอเลสเซอร์ชนิดที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง ที่ความเข้มข้นน้อยกว่า ความเร็วการไหลต่างๆ ตลอดช่วงเวลาการทดลองและร้อยละการกำจัดที่ความเข้มข้นและความเร็วการไหลต่างๆ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นการนำความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียขาออกจากระบบตั้งแต่ชั่วโมงที่ 3-8 มาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.3 ร้อยละการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มของระบบโคเอเลสเซอร์ที่มีเส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ความเข้มข้นน้อยกว่า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเร็วการไหล (เซนติเมตรต่อวินาที)	ร้อยละการบำบัด	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
700	0.1	31	4.68
	0.25	58	6.24
	0.5	19	9.63
1200	0.1	86	4.86
	0.25	76	7.14
	0.5	65	4.49
2000	0.1	65	6.41
	0.25	77	1.86
	0.5	69	6.15



ภาพที่ 4.6 ประสิทธิภาพระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเร็วการไหล 0.1 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที

จากภาพที่ 4.5 เป็นแผนภูมิแสดงความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มที่หลงเหลืออยู่ในน้ำเสียขาออก และ ร้อยละการบำบัดของระบบโคเอลเสเซอร์ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางในการยึดเกาะอนุภาคของเม็ดน้ำมันโดยทำการเปลี่ยนแปลงที่ความเข้มข้นและความเร็วการไหลต่างๆ ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นน้ำมันของน้ำมันน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตรจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดในรูปของร้อยละการบำบัดได้มากกว่าที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า คือที่ความเข้มข้นของน้ำมันเริ่มต้นน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีที่สุดที่ความเร็วการไหล 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที ร้อยละ 58 ที่ความเข้มข้นของน้ำมันเริ่มต้นน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 80 และที่ความเข้มข้นของน้ำมันเริ่มต้นน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 65

ในด้านความเข้มข้นของน้ำมันที่หลงเหลือในน้ำเสียขาออก พบว่าที่ความเข้มข้นน้อยกว่าน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตรมีน้ำมันเปลี่ยนแปลงลดลงเหลือประมาณ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นน้อยกว่าน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตรมีน้ำมันลดลง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ความเข้มข้นน้อยกว่าน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตรมีความเข้มข้นของน้ำมันลดลง 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร

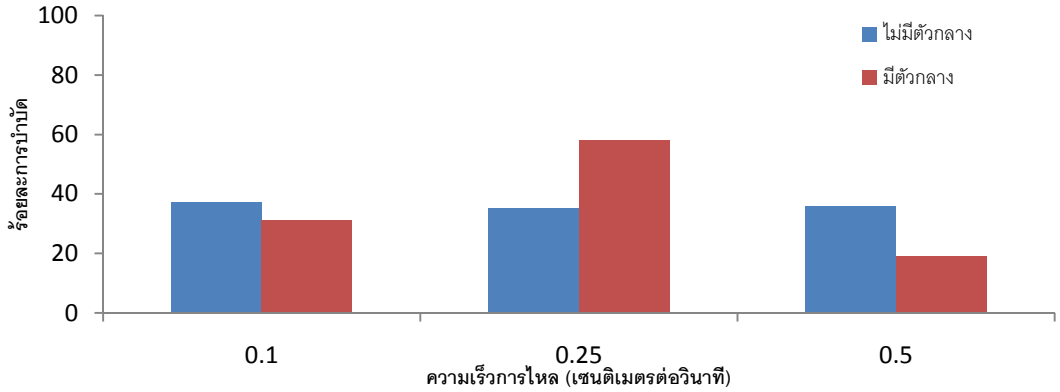
ประสิทธิภาพในการบำบัด และความเข้มข้นของน้ำมันที่ลดลงเมื่อทำการวิเคราะห์ในน้ำเสียที่ออกจากระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม เกิดจากการที่ตัวกลางซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใยช่วยในการเกาะยึดเม็ดน้ำมันทำให้เกิดการรวมตัวของเม็ดน้ำมันได้ง่ายกว่า ระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง

การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลของน้ำเสียเมื่อเข้าระบบ ทำให้การรวมตัวของเม็ดน้ำมันเปลี่ยนแปลงคือ เมื่อความเร็วการไหลต่ำอนุภาคของเม็ดน้ำมันจะเกิดการเกาะติดที่ตัวกลางได้ไม่ดี เนื่องเท่าที่ความเร็วการไหลปานกลาง ที่ความเร็วการไหลปานกลาง เม็ดน้ำมันจะสามารถเกาะยึดและเกิดการรวมตัวกันจากอนุภาคเม็ดน้ำมันที่มีขนาดเล็กกลายเป็นอนุภาคเม็ดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และเกิดการแยกตัวออกจากชั้นตัวกลางสู่ส่วนตกตะกอนด้านบนถังปฏิกรณ์ได้ และเมื่อความเร็วการไหลที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการรวมตัวกันได้ดี แต่ความเร็วการไหลที่สูงจะทำให้เกิดความปั่นป่วนภายในถังปฏิกรณ์และภายในชั้นตัวกลางได้ ความปั่นป่วนนี้จะทำให้เม็ดน้ำมันไม่สามารถเกาะยึดตัวกลางได้ดีนักจึงมีผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำ

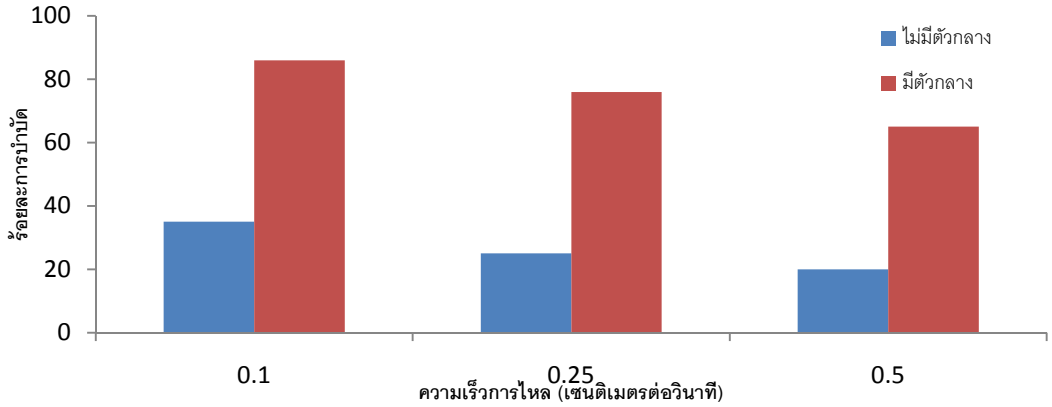
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของระบบโคเอเลสเซอร์ที่มี และ ไม่มีตัวกลางประเภทเส้นใยในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

เป็นการนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวกลางประเภทเส้นใยปาล์มที่ใช้ในการทดลองเพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้น และ ความเร็วการไหลต่างๆซึ่งจากผลการทดลองได้ดังแผนภูมิที่ 4.7

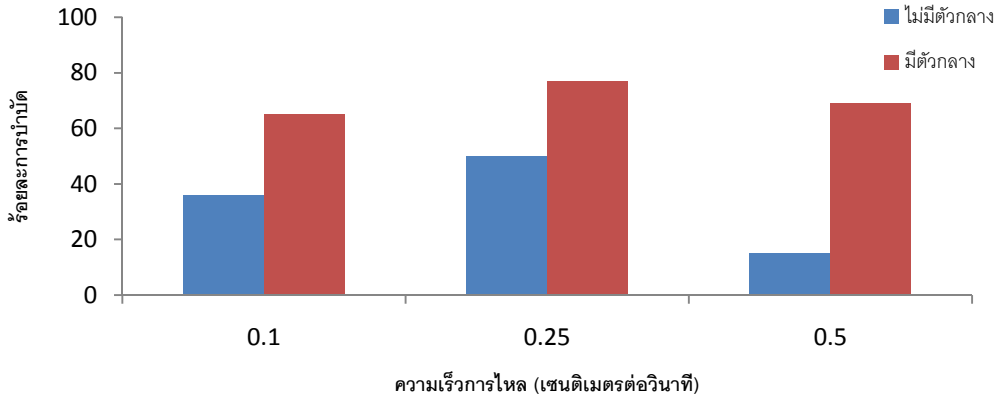
(ก)



(ข)



(ค)



ภาพที่ 4.7 แผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางและมีตัวกลางที่ความเร็วการไหล 0.1 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที (ก) ความเข้มข้นน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข) ความเข้มข้นน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค) ความเข้มข้นน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากแผนภูมิพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง สามารถบำบัดได้ดีกว่า ระบบที่ไม่มีตัวกลางเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันมากกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นความเข้มข้นที่ต่ำจึงทำให้การเกาะยึดของเม็ดน้ำมันบนผิวหน้าของตัวกลางประเภทเส้นใยปาล์มยังไม่ทั่วถึงดีนัก การทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีชั้นตัวกลางได้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบโคเอเลสเซอร์ที่มีตัวกลาง

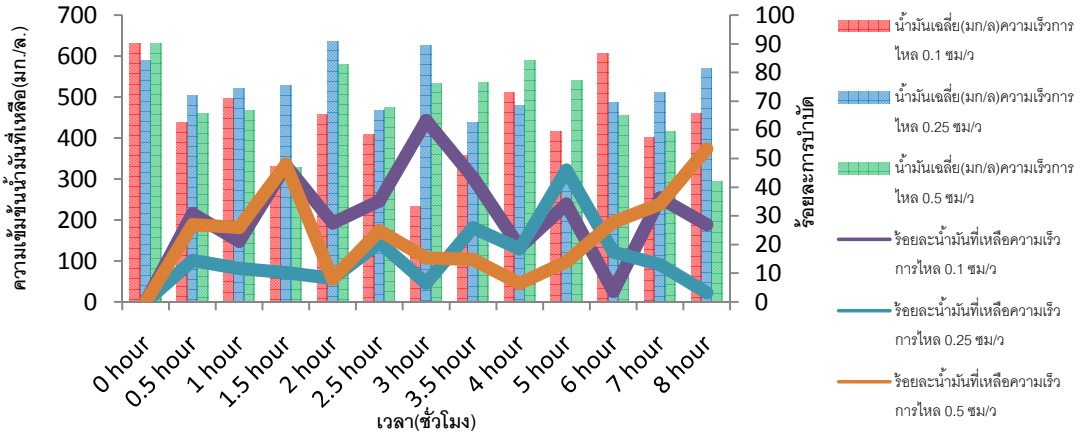
สำหรับการบำบัดในความเข้มข้น และ ความเร็วการไหลอื่นๆ พบว่าการใช้ตัวกลางจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีกว่าระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง เนื่องจากในการใช้ระบบโคเอเลสเซอร์ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันนั้น ตัวกลางของระบบที่จะช่วยยึดเหนี่ยวอนุภาคขนาดเล็กของเม็ดน้ำมันที่ไหลผ่านตัวกลาง ทำให้เกิดการรวมตัวกันจากอนุภาคเม็ดน้ำมันที่มีขนาดเล็ก กลายเป็นอนุภาคเม็ดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ และเมื่ออนุภาคเม็ดน้ำมันมีขนาดใหญ่พอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของตัวกลางต่ออนุภาคเม็ดน้ำมันจะเกิดการลอยตัวสู่ส่วนตกตะกอนที่ได้เตรียมไว้ด้านบนของถังปฏิกรณ์ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มขึ้นกับความเร็วและความเข้มข้นของน้ำมัน

4.2.3 การทดลองเพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซล ของระบบโคเอเลสเซอร์ ที่ปราศจากตัวกลาง

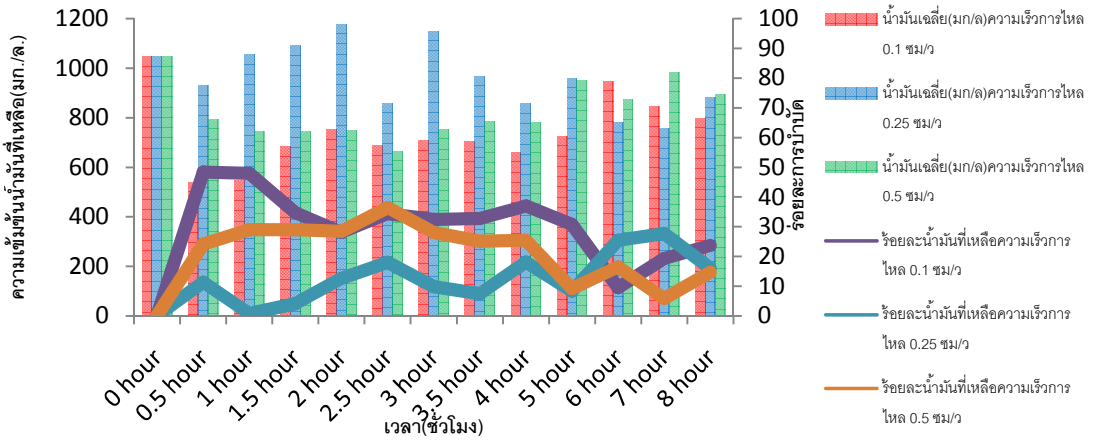
การทดลองนี้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง ผลการทดลองที่ได้ เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่ลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันของน้ำมันไบโอดีเซล ผลการทดลองเป็นดังภาพที่ 4.8

ภาพที่ 4.8 แสดงร้อยละการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลด้วยโคเอเลสเซอร์ชนิดที่ไม่มีตัวกลาง ที่ความเข้มข้นน้อยกว่า ความเร็วการไหลต่างๆ ตลอดช่วงเวลาการทดลองและร้อยละการกำจัดที่ความเข้มข้นและความเร็วการไหลต่างๆ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.4

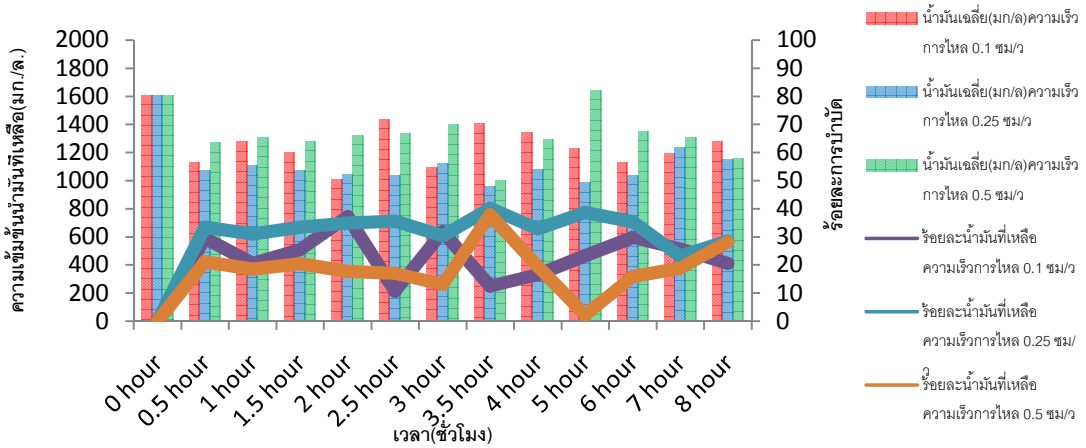
(ก)



(ข)



(ค)

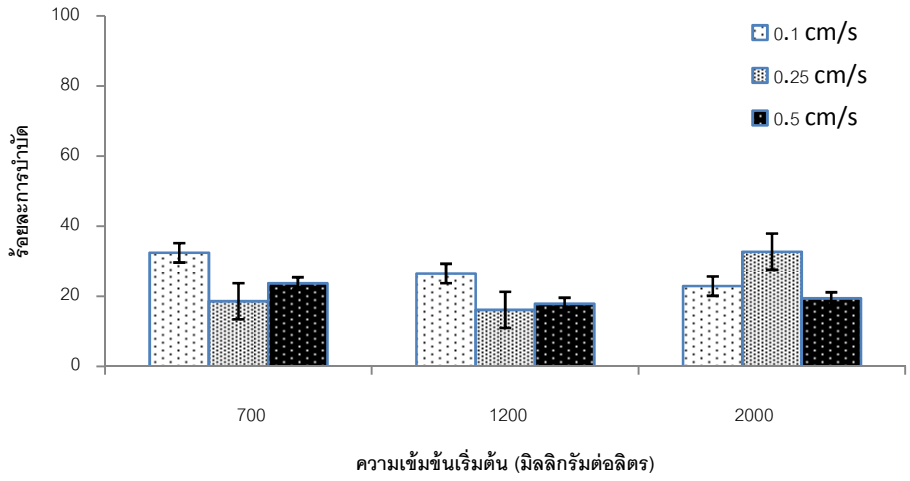


ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเร็วการไหล 0.1 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที (ก) ความเข้มข้นน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข) ความเข้มข้นน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค) ความเข้มข้นน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อนำผลการทดลองมาสรุปเป็นร้อยละการบำบัดเฉลี่ย เพื่อทราบถึงประสิทธิภาพของระบบจะได้ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งเป็นการนำความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียขาออกจากระบบตั้งแต่ชั่วโมงที่ 3-8 มาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.4 ร้อยละการบำบัดเฉลี่ยของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง

ความเข้มข้นน้อยกว่า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเร็วการไหล (เซนติเมตรต่อวินาที)	ร้อยละการบำบัด	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
700	0.1	32	17
	0.25	18	14.23
	0.5	23	16.09
1200	0.1	26	9.57
	0.25	16	8.18
	0.5	17	8.6
2000	0.1	22	6.93
	0.25	32	5.94
	0.5	19	11.3



ภาพที่ 4.9 ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเร็วการไหล 0.1 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที

จากภาพที่ 4.8 เป็นแผนภูมิแสดงความเข้มข้นของน้ำมันไบโอดีเซลที่หลงเหลืออยู่ในน้ำเสียขาออก และ ร้อยละการบำบัดของระบบโคเอลเสเซอร์ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ไม่มีตัวกลางโดยทำการเปลี่ยนแปลงที่ความเข้มข้นและความเร็วการไหลต่างๆ ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นน้ำมันมากจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดในรูปของร้อยละการบำบัดได้ใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 25 ของค่าน้ำมันเริ่มต้น เมื่อพิจารณาแต่ละความเข้มข้นพบว่าที่ความเข้มข้นน้อยกว่าน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วการไหลที่ต่ำที่สุดจะทำให้ร้อยละการบำบัดน้ำมันลดลงมากที่สุด คือ ร้อยละ 32 ในขณะที่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นเป็นในช่วงน้อยกว่า 1200 จากการทดลองพบว่าความเร็วการไหลที่ต่ำที่สุดจะทำให้ร้อยละการบำบัดน้ำมันลดลงมากที่สุด คือ ร้อยละ 26 และที่ความเข้มข้นน้อยกว่าน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วการไหลที่สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ดีที่สุดคือ 0.25 เซนติเมตรต่อวินาทีมีประสิทธิภาพที่ร้อยละ 32

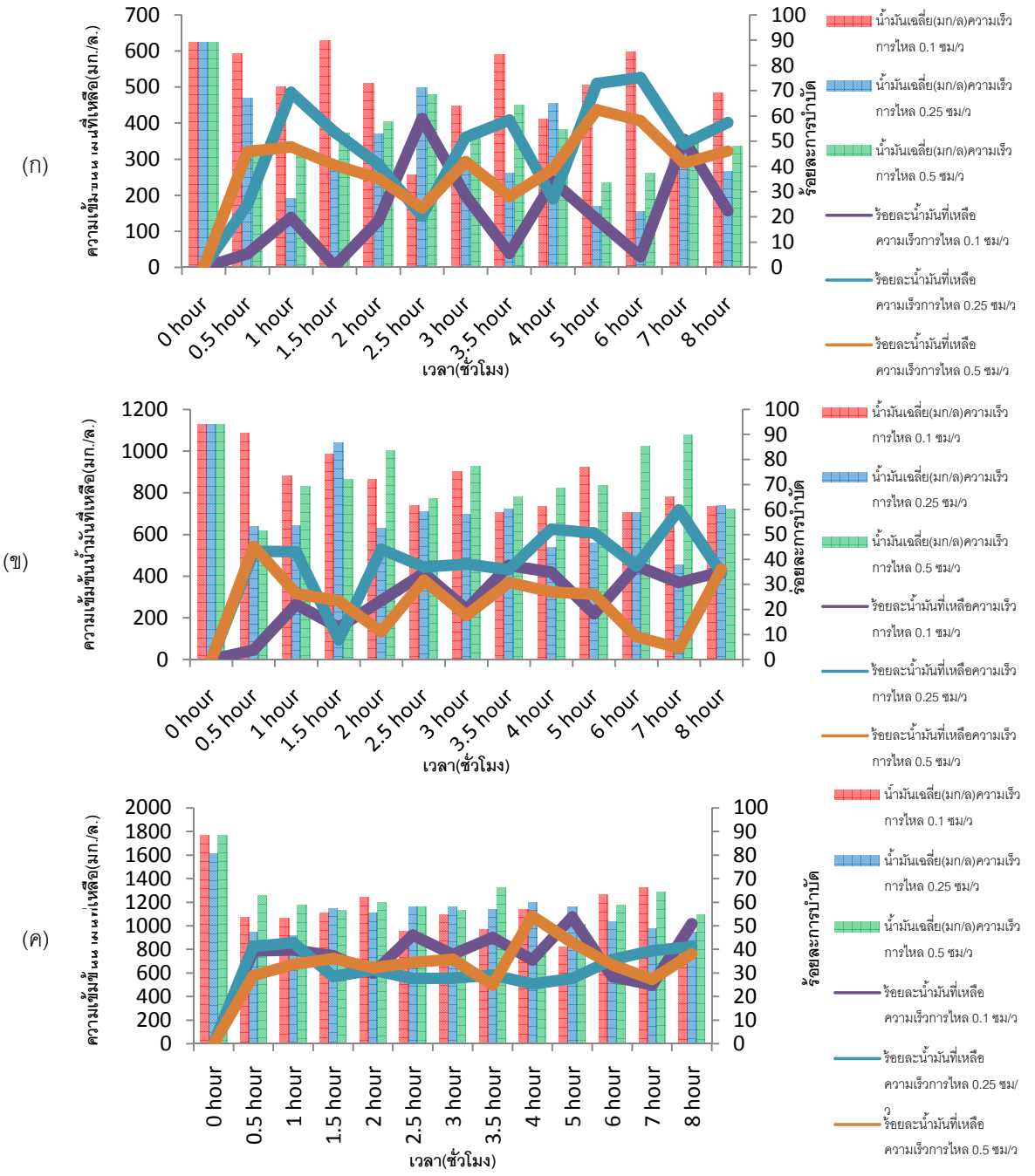
ความเร็วการไหลที่สูงขึ้นจากความเร็วการไหลต่ำเป็นความเร็วการไหลปานกลางทำให้เวลาในการกักเก็บน้ำเสียลดลง เมื่อเวลาในการกักเก็บน้ำเสียลดลงอนุภาคของเม็ดน้ำมันก็มีโอกาสที่จะชนกันได้น้อยกว่าที่เวลากักเก็บน้ำเสียมากกว่า และที่ความเร็วการไหลสูงจะทำให้เกิดแรงเฉือน และเกิดความปั่นป่วนขึ้นภายในถังปฏิกรณ์โคเอเลสเซอร์ คือเมื่ออนุภาคของเม็ดน้ำมันสามารถชนกันและรวมตัวกันได้แล้ว จะเกิดความปั่นป่วนที่ทำให้เม็ดน้ำมันแตกตัวกลายเป็นอนุภาคที่เล็กลงอีกครั้ง และเนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลซึ่งเป็นน้ำมันที่มีความหนืดต่ำกว่าน้ำมันปาล์ม ทำให้เวลาที่ต้องการเพื่อให้อนุภาคขนาดเล็กรวมตัวกันได้ โดยแรงลอยตัวต้องใช้เวลานานกว่าน้ำมันปาล์ม ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ความเร็วการไหลต่ำจึงมีประสิทธิภาพที่ดี

เมื่อเปรียบเทียบในด้านของการกำจัดในรูปของความเข้มข้นของน้ำมันที่หลงเหลืออยู่ในน้ำเสียขาออก พบว่า ที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดน้ำมันออกได้โดยเฉลี่ย 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดน้ำมันออกได้เฉลี่ย 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าจะสามารถกำจัดน้ำมันได้เฉลี่ย 400 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งการที่ปริมาณน้ำมันที่ถูกกำจัดในรูปของความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัมต่อลิตร) มีมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันมีมากขึ้น เนื่องจาก การเพิ่มปริมาณน้ำมันทำให้โอกาสในการชนตัวของอนุภาคเม็ดน้ำมันที่ได้กระจายอยู่ในอิมัลชันมีมากขึ้นจึงเป็นผลให้เกิดการจับตัวกันของอนุภาคน้ำมันและลอยตัวเข้าสู่ส่วนตกตะกอนที่เตรียมไว้ด้านบนของถังปฏิกรณ์มากขึ้น ความเข้มข้นของน้ำมันเมื่อวิเคราะห์ที่น้ำเสียขาออกจึงลดลง

4.2.4 การทดลองเพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซล ของระบบโคเอเลสเซอร์ ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลของระบบโคเอเลสเซอร์ที่มีเส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง ผลการทดลองเป็นดังภาพที่ 4.10

ภาพที่ 4.10 แสดงร้อยละการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลด้วยโคเอเลสเซอร์ชนิดที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง ที่ความเข้มข้นน้อยกว่า ความเร็วการไหลต่างๆ ตลอดช่วงเวลาการทดลองและร้อยละการกำจัดที่ความเข้มข้นและความเร็วการไหลต่างๆ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.5

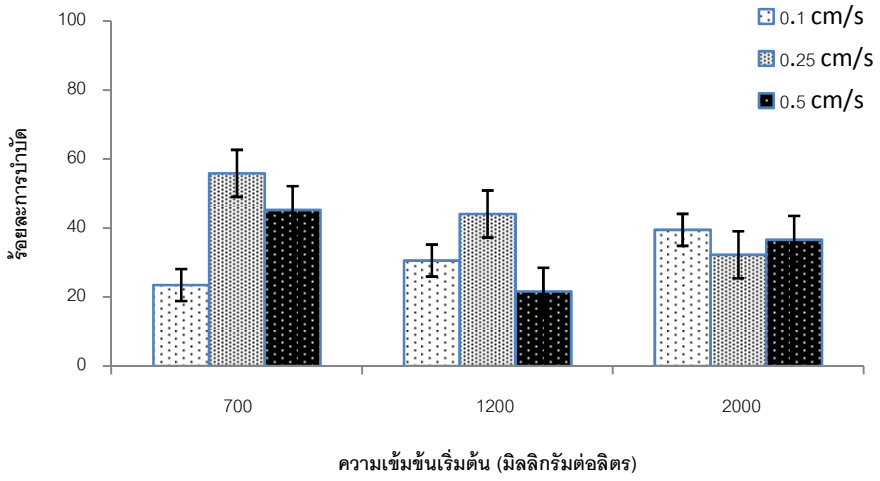


ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเร็วการไหล 0.1 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที (ก) ความเข้มข้นน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข) ความเข้มข้นน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค) ความเข้มข้นน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อนำผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลมาสรุปเป็นค่าเฉลี่ยได้ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งเป็นการนำความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียขาออกจากระบบตั้งแต่ชั่วโมงที่ 3-8 มาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.5 ร้อยละการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซล โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเร็วการไหล (เซนติเมตรต่อวินาที)	ร้อยละการบำบัด	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
700	0.1	23	18.67
	0.25	55	16.13
	0.5	45	11.73
1200	0.1	30	8.15
	0.25	44	9.93
	0.5	21	11.59
2000	0.1	39	10.89
	0.25	32	6.33
	0.5	36	9.82



ภาพที่ 4.11 ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเร็วการไหล 0.1 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที

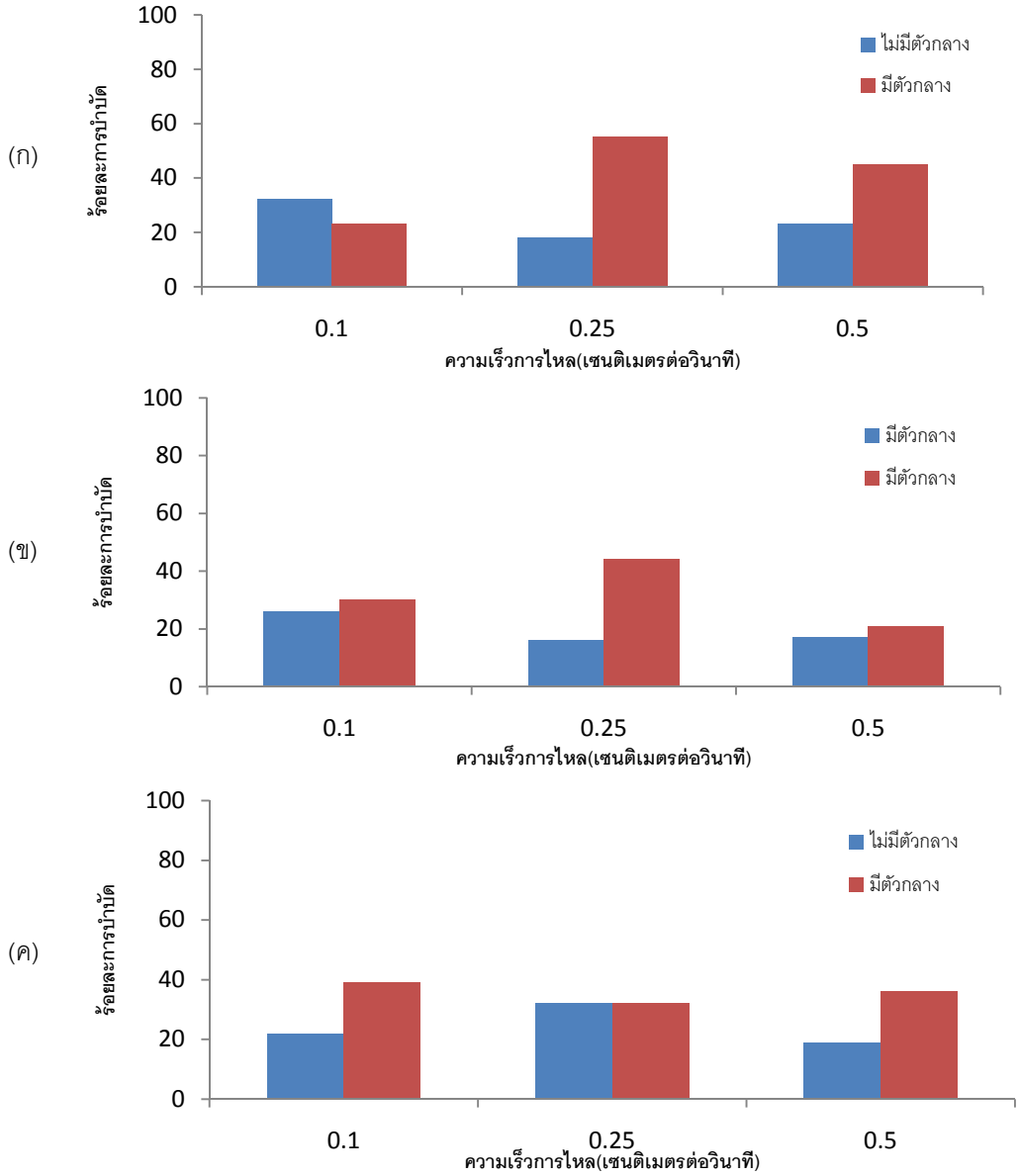
จากภาพที่ 4.10 เป็นแผนภูมิแสดงความเข้มข้นของน้ำมันไบโอดีเซลที่หลงเหลืออยู่ในน้ำเสียขาออก และ ร้อยละการบำบัดของระบบโคเอลเสเซอร์ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางโดยทำการเปลี่ยนแปลงที่ความเข้มข้นและความเร็วการไหลต่างๆ ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นน้ำมันมากจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดในรูปของร้อยละการบำบัดได้ใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 40 ของค่าน้ำมันเริ่มต้น เมื่อพิจารณาแต่ละความเข้มข้นพบว่าที่ความเข้มข้นน้อยกว่าน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วการไหลที่ 0.25 เซนติเมตรต่อวินาทีเป็นความเร็วการไหลที่ทำให้ร้อยละการบำบัดน้ำมันลดลงมากที่สุด คือ ร้อยละ 55 ในขณะที่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นเป็นในช่วงน้อยกว่า 1200 จากการทดลองพบว่าความเร็วการไหลที่ 0.25 เซนติเมตรต่อวินาทีเป็นความเร็วการไหลที่ทำให้ร้อยละการบำบัดน้ำมันลดลงมากที่สุด คือ ร้อยละ 44 และที่ความเข้มข้นน้อยกว่าน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วการไหลที่สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ดีที่สุดคือ 0.1 เซนติเมตรต่อวินาทีมีประสิทธิภาพที่ร้อยละ 39

ความเร็วการไหลที่สูงขึ้นจากความเร็วการไหลต่ำเป็นความเร็วการไหลที่สูงขึ้นทำให้เวลาในการกักเก็บน้ำเสียลดลง เมื่อเวลาในการกักเก็บน้ำเสียลดลงอนุภาคของเม็ดน้ำมันก็มีโอกาสที่จะชนกันได้น้อยกว่าที่เวลากักเก็บน้ำเสียมากกว่า และที่ความเร็วการไหลสูงจะทำให้เกิดแรงเฉือนและเกิดความปั่นป่วนขึ้นภายในถังปฏิกรณ์โคเอเลสเซอร์ คือเมื่ออนุภาคของเม็ดน้ำมันสามารถชนกันและรวมตัวกันได้แล้ว จะเกิดความปั่นป่วนที่ทำให้เม็ดน้ำมันแตกตัวกลายเป็นอนุภาคที่เล็กลงอีกครั้ง และเนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลซึ่งเป็นน้ำมันที่มีความหนืดต่ำกว่าน้ำมันปาล์ม ทำให้เวลาที่ต้องการเพื่อให้อนุภาคขนาดเล็กรวมตัวกันได้ โดยแรงลอยตัวต้องใช้เวลานานกว่าน้ำมันปาล์ม ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ความเร็วการไหลต่ำจึงมีประสิทธิภาพที่ดี

เมื่อเปรียบเทียบในด้านของการกำจัดในรูปของความเข้มข้นของน้ำมันที่หลงเหลืออยู่ในน้ำเสียขาออก พบว่า ที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดน้ำมันออกได้โดยเฉลี่ย 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดน้ำมันออกได้เฉลี่ย 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าจะสามารถกำจัดน้ำมันได้เฉลี่ย 400 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งการที่ปริมาณน้ำมันที่ถูกกำจัดในรูปของความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัมต่อลิตร) มีมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันมีมากขึ้น เนื่องจาก การเพิ่มปริมาณน้ำมันทำให้โอกาสในการชนตัวของอนุภาคเม็ดน้ำมันที่ได้กระจายอยู่ในอิมัลชันมีมากขึ้นจึงเป็นผลให้เกิดการจับตัวกันของอนุภาคน้ำมันและลอยตัวเข้าสู่ส่วนตกตะกอนที่เตรียมไว้ด้านบนของถังปฏิกรณ์มากขึ้น ความเข้มข้นของน้ำมันเมื่อวิเคราะห์ที่น้ำเสียขาออกจึงลดลง

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของระบบโคเอเลสเซอร์ที่มี และ ไม่มีตัวกลางประเภทเส้นใยในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซล

เป็นการนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวกลางประเภทเส้นใยปาล์มที่ใช้ในการทดลองเพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้น และ ความเร็วการไหลต่างๆซึ่งจากผลการทดลองได้ดังแผนภูมิที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 แผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางและมีตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเร็วการไหล 0.1 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที (ก) ความเข้มข้นน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข) ความเข้มข้นน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค)ความเข้มข้นน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากแผนภูมิ 4.12 พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง สามารถบำบัดได้ดีกว่า ระบบที่ไม่มีตัวกลางเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันมากกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตรและอัตราการไหลที่ 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นความเข้มข้นที่ต่ำจึงทำให้การเกาะยึดของเม็ดน้ำมันบนผิวหน้าของตัวกลางประเภทเส้นใยปาล์มยังไม่ทั่วถึงดีนัก การทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีชั้นตัวกลางได้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบโคเอเลสเซอร์ที่มีตัวกลาง

สำหรับการบำบัดในความเข้มข้น และ ความเร็วการไหลอื่นๆ พบว่าการใช้ตัวกลางจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีกว่าระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง เนื่องจากในการใช้ระบบโคเอเลสเซอร์ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันนั้น ตัวกลางของระบบที่จะช่วยยึดเหนี่ยวอนุภาคขนาดเล็กของเม็ดน้ำมันที่ไหลผ่านตัวกลางอ ทำให้เกิดการรวมตัวกันจากอนุภาคเม็ดน้ำมันที่มีขนาดเล็ก กลายเป็นอนุภาคเม็ดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ และเมื่ออนุภาคเม็ดน้ำมันมีขนาดใหญ่พอที่จะเอาชนะแรงยึดของตัวกลางจะเกิดการลอยตัวสู่ส่วนตกตะกอนที่ได้เตรียมไว้ด้านบนของถังปฏิกรณ์ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลขึ้นกับความเร็วและความเข้มข้นของน้ำมัน

ที่ความเร็วการไหลของน้ำเสียสูงขึ้นอนุภาคน้ำมันจะเกิดการรวมตัวกันได้ยากขึ้น และอนุภาคน้ำมันที่เกิดการรวมตัวแล้วจะเกิดแรงเฉือนทำให้เม็ดน้ำมันแตกตัวอีกครั้งจึงเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำลง

ภาพที่ 4.13 ลักษณะน้ำเสียหลังผ่านระบบโคเอเลสเซอร์

4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหล

จากผลการทดลองที่ 1 และผลการทดลองที่ 2 ซึ่งใช้น้ำมันปาล์มเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของน้ำเสีย โดยทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลที่ 0.1 0.25 และ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มของระบบจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง (ประมาณ 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที) หลังจากนั้นเมื่อทำการเพิ่มความเร็วการไหลขึ้นอีกประสิทธิภาพจะลดลง

และจากผลการทดลองที่ 3 และผลการทดลองที่ 4 ซึ่งใช้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของน้ำเสีย โดยทำการเปลี่ยนแปลงการไหลเช่นกัน พบว่า ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์มีแนวโน้มที่จะลดลง เมื่อความเร็วการไหลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกัน สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

และจากสมการเลขของเรย์โนลด์ (4.1) เมื่อเพิ่มความเร็วการไหล จะทำให้เลขเรย์โนลด์เพิ่มมากขึ้นด้วย ทำให้เกิดความปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเลขเรย์โนลด์ เป็นดังตารางที่ 4.6

$$N_{\mathrm{Re}} = \frac{dV\rho}{(1-\varepsilon)\mu} \tag{4.1}$$

เมื่อ N_{Re} : เลขเรย์โนลด์

D : เส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)

V : ความเร็วการไหล (เมตรต่อวินาที)

ρ : ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

ε : ความเร็วการไหลบนผิว (เมตรต่อวินาที)

μ : ความหนืดของเหลว (พาสคาล)

ตารางที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหล และเลขเรย์โนลด์ที่ใช้ในการทดลอง

ความเร็วการไหล	Reynolds number
0.5	158
0.25	79.2
0.1	31.7

ผลการทดลองนั้นอันจากที่ความเร็วการไหลที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการชนตัวและการชนตัวนี้เองทำให้เกิดการรวมตัวของเม็ดน้ำมัน ในช่วงแรก หลักจากนั้น เมื่อความเร็วการไหลเพิ่มมากขึ้น การชนตัวจะเปลี่ยนแปลงเป็นแรงเฉือนและสร้างความปั่นป่วน เป็นผลให้อนุภาคของเม็ดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่อยู่เกิดการแตกตัว และอนุภาคเม็ดน้ำมันที่ถูกชั้นตัวกลางจับไว้ได้หลุดออกมา เป็นการเพิ่มความเข้มข้นให้น้ำเสียขาออก ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดต่ำลง เช่นเดียวกับ ผลการวิจัยของ (วุฒิวัฒ, 2552) ซึ่งทำการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหล ผ่านชั้นตัวกลางโลหะ พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วการไหล จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียต่ำลง

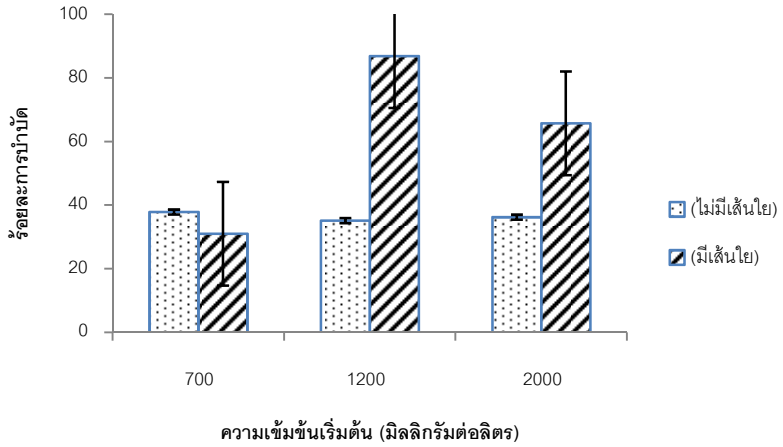
4.3.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำเสีย

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มในน้ำเสีย พบว่า เมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ระบบสามารถบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย ดังตารางที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8 อันเนื่องมากจากโอกาสของการรวมตัวมีมากขึ้น คือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นนั้น จะทำให้น้ำมันสามารถชน และเกิดการรวมตัวได้ง่ายขึ้น

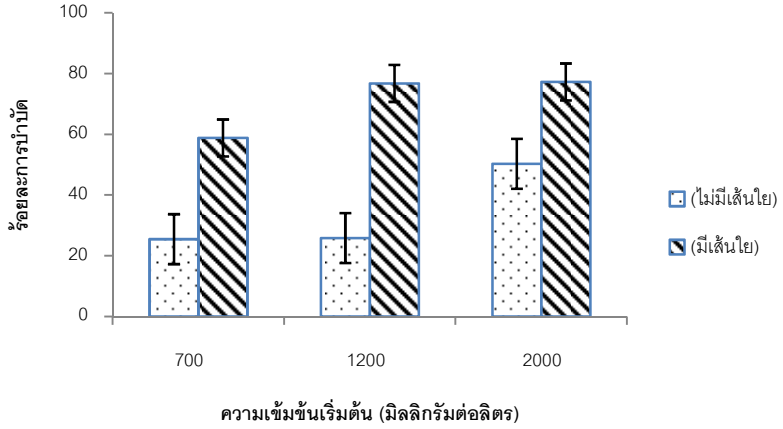
ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดโดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำมันปาล์ม

ความเร็วการไหล (เซนติเมตรต่อวินาที)	ความเข้มข้นน้อยกว่า(มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการบำบัด (ไม่มีเส้นใย)	ร้อยละการบำบัด (มีเส้นใย)
0.1	700	37	31.07
	1200	35	86.95
	2000	36	65.8
0.25	700	25	58.82
	1200	25	76.79
	2000	50	77.28
0.5	700	48	18.98
	1200	20	65.64
	2000	15	69.69

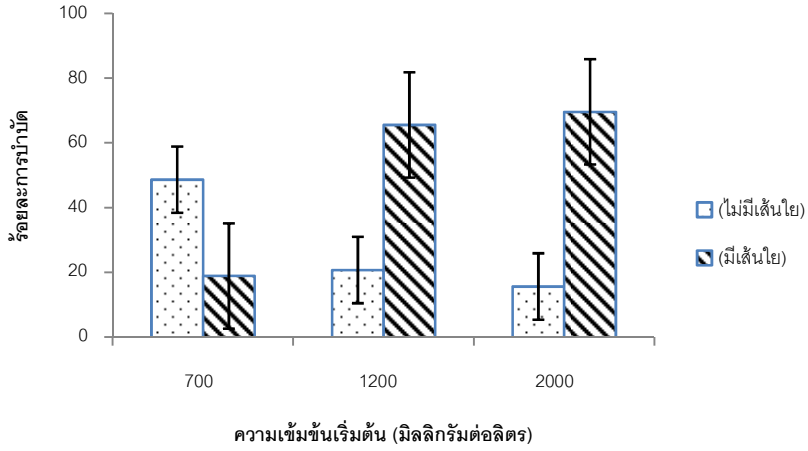
(ก)



(ข)



(ค)

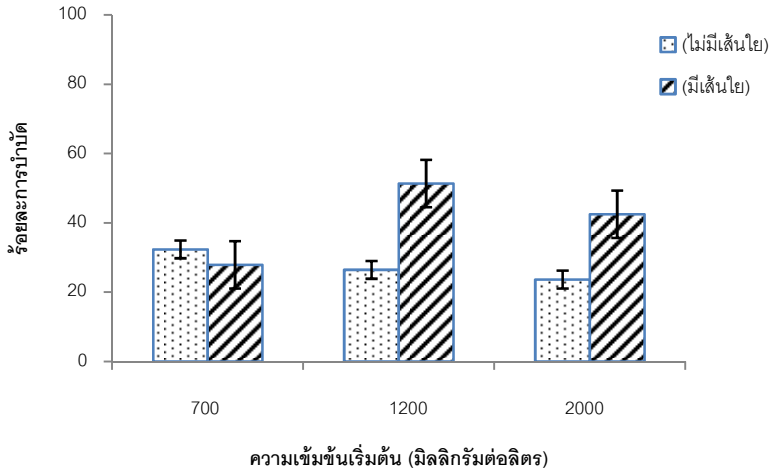


ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำมัน (ก) ความเร็วการไหล 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที (ข) ความเร็วการไหล 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที (ค) ความเร็วการไหล 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที

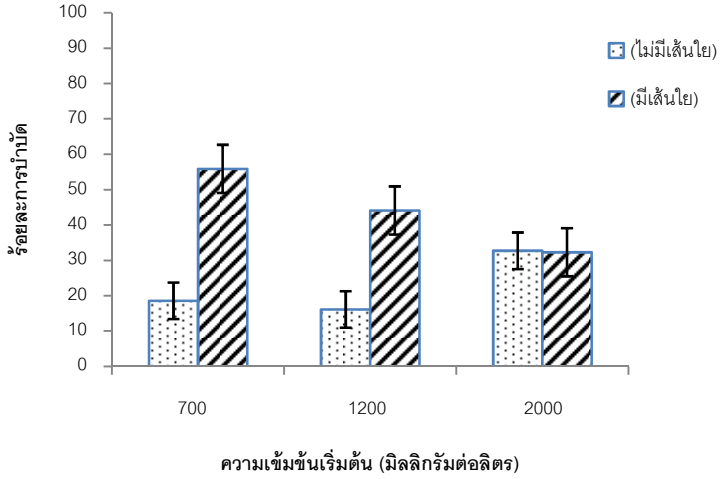
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดโดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้อยกว่าของน้ำมันไบโอดีเซล

ความเร็วการไหล (เซนติเมตรต่อวินาที)	ความเข้มข้นน้อยกว่า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการบำบัด (ไม่มีเส้นใย)	ร้อยละการบำบัด (มีเส้นใย)
0.1	700	32	27.93
	1200	26	51.43
	2000	23	42.53
0.25	700	18	55.89
	1200	16	44.11
	2000	32	32.29
0.5	700	23	45.26
	1200	17	21.64
	2000	19	36.66

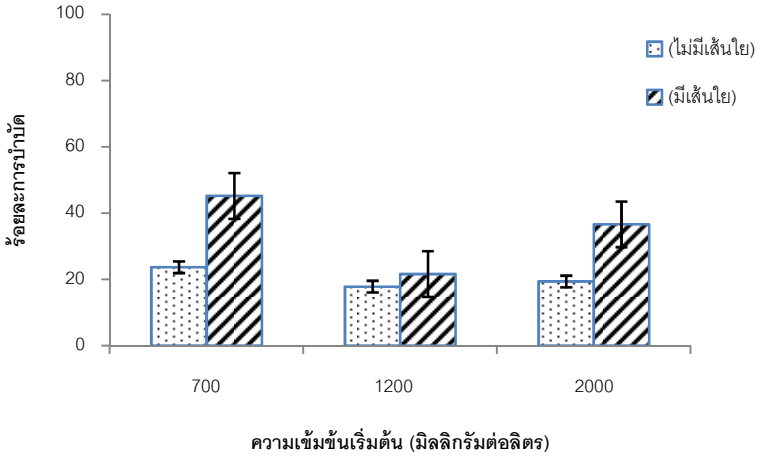
(ก)



(ข)



(ค)



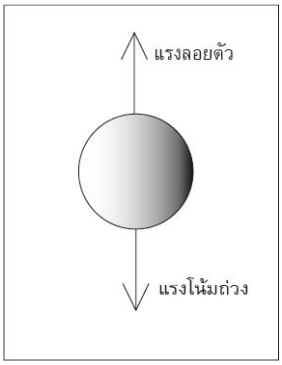
ภาพที่ 4.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซล เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำมัน (ก) ความเร็วการไหล 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที (ข) ความเร็วการไหล 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที (ค) ความเร็วการไหล 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที

น้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม สามารถรวมตัวกันได้ดีเมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นน้อยกว่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลน้ำเสียจะรวมตัวกันได้ดีขึ้นที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสามารถรวมตัวและบำบัดน้ำมันได้ดีกว่า น้ำมันไบโอดีเซล

การเพิ่มความเข้มข้นน้อยกว่าเป็นผลให้มีโอกาสที่จะเกิดการชนมากขึ้น ประกอบกันกับความหนืดที่มากของน้ำมันปาล์ม ทำให้เมื่อเกิดการชนแล้ว เม็ดน้ำมันจะเกาะรวมตัวกันได้ดีกว่าน้ำมันไบโอดีเซล

4.3.3 ประสิทธิภาพการบำบัดของโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง

ประสิทธิภาพของการบำบัดโดยโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางนี้เกิดจากแรงภายในตัวถังปฏิกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่กระทำต่ออนุภาคเม็ดน้ำมันที่กระจายอยู่ภายในน้ำเสีย ซึ่งการที่ระบบโคเอเลสเซอร์เป็นระบบแบบสูบน้ำเสียขึ้นจากด้านล่างสู่ด้านบน (Up flow) เกิดเป็นแรงลอยตัว ดังภาพที่ 4.16 ทำให้เม็ดน้ำมันมีเวลากักเก็บ (RetentionTime) มากเพียงพอที่จะสามารถเกิดการชนและการรวมตัวกันเองได้ แต่เนื่องจากเม็ดน้ำมันที่เป็นอิมัลชันมีขนาดเล็ก จึงทำให้การรวมตัวไม่ได้รวดเร็วและดีนัก ดังตารางที่ 4.9



ภาพที่ 4.16 แรงที่กระทำต่ออนุภาคเม็ดน้ำมันในระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง

ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มได้ร้อยละ 50 และน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซล ได้ร้อยละ 30 ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบร้อยละการบำบัดระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง

ความเข้มข้นน้อยกว่า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	**ความเร็วการไหล (เซนติเมตรต่อวินาที)**	**ร้อยละการบำบัด**	
		น้ำมันปาล์ม	**น้ำมันไบโอดีเซล**
700	0.1	37	32
	0.25	25	18
	0.5	48	23
1200	0.1	35	26
	0.25	25	16
	0.5	20	17
2000	0.1	36	22
	0.25	50	32
	0.5	15	19

4.3.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงประเภทน้ำมันที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงน้ำมันที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์มีการเปลี่ยนแปลง คือ ระบบโคเอเลสเซอร์มีประสิทธิภาพที่ดีเมื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนปาล์มดีกว่าน้ำมันไบโอดีเซลเล็กน้อยประมาณร้อยละ 10-15 เนื่องจากอนุภาคของเม็ดน้ำมันที่มีความหนืดมากทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของเม็ดน้ำมันเมื่อเกิดการชนกันได้ง่ายกว่าอนุภาคของเม็ดน้ำมันที่มีความหนืดน้อยกว่า และ น้ำมันที่มีความหนืดน้อยกว่า จะทำให้อนุภาคของเม็ดน้ำมันมีขนาดเล็กลงกว่า น้ำมันที่มีความหนืดมาก การลดลงของขนาดเม็ดน้ำมันนี้ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของเม็ดน้ำมันลดลง โอกาสในการชนกันของเม็ดน้ำมันจึงลดลง ซึ่งเป็นไปดังการทดลองเมื่อเปลี่ยนประเภทของน้ำมันที่ใช้ในการทดลองจาก

น้ำมันไบโอดีเซลซึ่งมีความหนืด 4.09 cP เป็นน้ำมันปาล์มซึ่งมีความหนืด 22.38 cP พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบดีขึ้น

ดังเช่นการทดลองของ Amaralikit (2004) ได้ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม โดยทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำเสีย พบว่า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบโคเอเลสเซอร์ลดลง

4.3.5 ประสิทธิภาพของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง เปรียบเทียบกับ ระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

จากการทดลองพบว่า การใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางจะทำให้ระบบโคเอเลสเซอร์มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ดีขึ้น ทั้งน้ำมันปาล์มและน้ำมันไบโอดีเซล

ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นนั้น แสดงให้เห็นว่าระบบโคเอเลสเซอร์ที่มีตัวกลาง มีประสิทธิภาพในการช่วยบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ เนื่องจาก ตัวกลางที่มีลักษณะเป็นเส้นใยจะมีส่วนในการช่วยเกาะยึดเม็ดน้ำมันที่มีอนุภาคขนาดเล็กเอาไว้ ทำให้เม็ดน้ำมันที่มีขนาดเล็กเกิดการชนกัน ทำให้เม็ดน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อเม็ดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่มากกว่า แรงดึงดูดของน้ำมันกับน้ำแล้ว เม็ดน้ำมันจึงสามารถแยกตัวออกจากน้ำได้ ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าการใช้แรงโน้มถ่วงในการชนกัน

และด้วยลักษณะเส้นใยที่ใช้ในการทดลอง เป็นเส้นใยปาล์มซึ่งมีผิวขรุขระ ทำให้ประสิทธิภาพของการเกาะยึดเม็ดน้ำมันไว้ดียิ่งขึ้นเนื่องจากพื้นผิวที่ขรุขระจะทำให้มีแรงกระทำต่อเม็ดน้ำมันมากกว่าแรงลอยตัว จึงทำให้เกิดการเกาะยึดเม็ดน้ำมันได้ดี และเป็นการเพิ่มโอกาสที่จะเกิดการชนกันของเม็ดน้ำมัน (Wanichkul, 2000)

4.3.6 การเปรียบเทียบกับตัวกลางในระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

จากผลการทดลอง พบว่า ตัวกลางประเภทเส้นใยปาล์ม สามารถบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มได้ร้อยละ 40-50

ตัวกลางของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น ตัวกลางประเภทเส้นใยไนล่อน หรือเส้นใยโลหะ (Wiwattanangkul, 2005) ได้ทำการทดลองในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่เป็นอิมัลชัน โดยเส้นใยไนล่อน และเส้นใยพอลิเอสเทอร์ ซึ่งได้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีที่สุดคือ ร้อยละ 20.81 และ ร้อยละ 33.71 ตามลำดับ

การใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม ได้ดีกว่าเส้นใยประเภทไนล่อน อันเนื่องจาก ตัวกลางประเภทเส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางที่ได้มาตามธรรมชาติ ซึ่งมีพื้นผิวที่ขรุขระมากกว่า ตัวกลางประเภทไนล่อน หรือ ตัวกลางประเภทพอลิเอสเทอร์ ความขรุขระทำให้เกิดการเกาะยึดตัวของเม็ดน้ำมันได้ดีกว่าตัวกลางที่พื้นผิวเรียบ (Amaralikit, 2004) เมื่อทำการเกาะยึดได้ดี จึงให้เกิดการรวมตัวของเม็ดน้ำมันได้ดี

4.3.7 การทดลองโดยใช้เรซิ่นเป็นตัวกลาง

การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองใช้ เรซิ่นเป็นตัวกลางในการทดลอง ซึ่งเรซิ่นที่ใช้ในการทดลองเป็นเรซิ่นประเภท รับประจุลบ ที่มีขายในท้องตลาดเพื่อช่วยรวมตัวทำให้เม็ดน้ำมันใหญ่ขึ้น โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับ การใช้ตัวกลางเป็นเส้นใยปาล์ม คือนำน้ำเสียที่ได้เตรียมด้วยวิธีการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ดังกล่าวไว้ในบทที่ 3 สูบน้ำเสียขึ้นผ่านระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เรซิ่นเป็นตัวกลาง เพื่อให้ชั้นเรซิ่นช่วยในการรวมตัวของอนุภาคเม็ดน้ำมันจากขนาดเล็กเป็นขนาดใหญ่

จากผลการทดลองพบว่า การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม โดยใช้เรซินเป็นตัวกลางในระบบโคเอเลสเซอร์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 31.06 และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลของระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เรซิ่นเป็นตัวกลาง มีประสิทธิภาพร้อยละ 9.05 ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวกลางประเภทต่างๆที่ความเข้มข้นน้อยกว่าของน้ำมัน 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วการไหล 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที

ประเภทของน้ำมัน	ชนิดของตัวกลาง	ร้อยละการบำบัด
น้ำมันปาล์ม	ไม่มีตัวกลาง	25
	เส้นใยปาล์ม	76
	เรซิ่น	31
น้ำมันไบโอดีเซล	ไม่มีตัวกลาง	16
	เส้นใยปาล์ม	44
	เรซิ่น	9

ประสิทธิภาพของเรซิ่นที่ใช้เป็นตัวกลางในระบบโคเอเลสเซอร์ มีประสิทธิภาพต่ำกว่าประสิทธิภาพของตัวกลางประเภทเส้นใยเนื่องจาก ลักษณะพื้นผิวของตัวกลาง ซึ่งพื้นผิวแบบทรงกลมเกลี้ยง มีประสิทธิภาพในการยึดเกาะได้น้อยกว่าพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นเส้นใยขรุขระ และการที่อนุภาคของเม็ดน้ำมันนั้นเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุที่ผิวหน้า เมื่อไหลผ่านชั้นตัวกลางที่เป็นเรซิ่นซึ่งจับตัวกับอนุภาคประจุลบทำให้เกิดการจับตัวกันได้น้อยกว่า (Maiti, 2010)

เมื่อพิจารณาในด้านขนาดอนุภาคภายในของน้ำเสียหลังผ่านจากระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เรซิ่นเป็นตัวกลางพบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม มีขนาดอนุภาค เพิ่มจาก 0.15 เป็น 0.2 ไมโครเมตร หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 46 และน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลหลังผ่านจากระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เรซิ่นเป็นตัวกลาง มีขนาดอนุภาคเพิ่มจาก 0.127 เป็น 0.146 ไมโครเมตร หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 14.96 แตกต่างจากระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางเป็นเส้นใย ที่สามารถเพิ่มขนาดเม็ดน้ำมันจากขนาด 0.49 ไมโครเมตร เป็นขนาดเฉลี่ยที่ 3.25 ไมโครเมตร ซึ่งจากการทดลองตัวกลางประเภทเส้นใยปาล์มสามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ดีกว่าตัวกลางประเภทเรซิ่น

นอกจากการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันโดยใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางได้ผลที่ดีกว่าแล้ว การใช้เศษเส้นใยปาล์มที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งซึ่งหาได้จากอุตสาหกรรมปาล์ม ยังเป็นการช่วยลดขยะที่เกิดจากอุตสาหกรรมอีกด้วย

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดลองแบ่งออกเป็น 5 การทดลองย่อยคือ การทดลองบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มโดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง การทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มโดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่มีเส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง การทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลโดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง และการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลโดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลางเปรียบเทียบกับการใช้เรซิ่นเป็นตัวกลาง ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สภาวะที่บำบัดได้ดีที่สุดในการทดลอง โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันของระบบโคเอเลสเซอร์ที่มีเส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง ควรมีความเร็วการไหลในช่วงปานกลางจนถึงช่วงต่ำ จากการทดลองควรมีความเร็วการไหลไม่เกิน 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งจากการทดลองมีประสิทธิภาพร้อยละในการบำบัด 86 สำหรับน้ำมันปาล์ม และ ร้อยละ 50 สำหรับน้ำมันไบโอดีเซล

2. ระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง สามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มและน้ำมันไบโอดีเซลได้ ซึ่งประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม ร้อยละ 30-40 และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันไบโอดีเซล ร้อยละ 20-25

3. ระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง สามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม และ น้ำมันไบโอดีเซลได้ โดยประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม ร้อยละ 50-65 และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซล ร้อยละ 30-50

4. ระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เรซิ่นเป็นตัวกลาง สามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม และ น้ำมันไบโอดีเซลได้ โดยประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มร้อยละ 30 และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซล ร้อยละ 9

5. การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้อยกว่าของน้ำมันในน้ำเสีย จากการทดลองพบว่าเมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นน้อยกว่ามากขึ้นระบบจะสามารถบำบัดได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

6. เมื่อทำการเพิ่มความเร็วการไหล ทำให้ประสิทธิภาพของการบำบัดลดลง อันเนื่องมาจากการเพิ่มความเร็วการไหล ทำให้เกิดความปั่นป่วนมากขึ้นแก่ระบบ นอกจากนั้นการเพิ่มความเร็วการไหลทำให้เกิดแรงเฉือนซึ่งน้ำมันที่ถูกยึดติดกับตัวกลางหลุดปนออกไปกับน้ำเสียขาออก ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง

7. การเปลี่ยนแปลงประเภทของน้ำมัน มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด คือ เมื่อน้ำมันมีความหนืดมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบโคเอเลสเซอร์เพิ่มขึ้น จากการทดลองเมื่อเปลี่ยนประเภทของน้ำมันที่ใช้ จากน้ำมันปาล์มซึ่งมีความหนืดมากกว่า เปรียบเทียบกับน้ำมันไบโอดีเซล ผลที่ได้คือ น้ำมันปาล์มมีร้อยละการบำบัดมากกว่าน้ำมันไบโอดีเซล ตามกฎของ สโตค

5.2 ข้อเสนอแนะการวิจัย

ข้อเสนอแนะการวิจัยเพื่อพัฒนาต่อในอนาคต

ควรทำการทดลองที่ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่กว้างมากขึ้น เช่น การทำลักษณะสมบัติของความเร็วการไหลที่น้อยลง หรือ ความเร็วการไหลในช่วงที่สูงขึ้น หรือการเติมสารลดแรงตึงผิวแทนการใช้วิธีการปั่นผสมน้ำมันเพื่อลดความผิดพลาดจากกระบวนการปั่น และการเปลี่ยนประเภทของน้ำมันที่ใช้เพื่อให้ครอบคลุม ประเภทของน้ำมันที่ใช้จริงในอุตสาหกรรม หรือ ทำการศึกษากับน้ำเสียจากระบบอุตสาหกรรมต่างๆจริง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ในด้านระบบโคเอเลสเซอร์ ควรทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงประเภทตัวกลางที่นำมาใช้ เช่น ตัวกลางชนิดเส้นใยประเภทอื่นๆ หรือ ตัวกลางที่เป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทต่างๆ หรือการดำเนินการนำระบบโคเอเลสเซอร์ไปใช้ร่วมกันกับระบบอื่นๆ เช่น การแยกน้ำมันด้วยไฟฟ้า การแยกน้ำมันโดยใช้อากาศ หรือ การแยกน้ำมันโดยใช้บ่อพัก เพื่อทำให้ระบบมีความเหมือนระบบจริงมากยิ่งขึ้น

ด้านการทดลอง ควรทำการทดลองทั้งแบบ หาปริมาณน้ำมันโดยตรง เปรียบเทียบกับการหาปริมาณน้ำมันโดยอ้อม เช่น การหาปริมาณน้ำมันในรูป ซีโอดี หรือการเพิ่มเติมการหาขนาดอนุภาคของเม็ดน้ำมันในน้ำเสียขาออก

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ชาริณี ม่วงคลองใหม่. 2551. การกำจัดสีเบสิกโดยเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธำรง โชตะมังสะ และ สุจิตต์ สนองคุณ. 2521. เชื้อเพลิงและวัสดุหล่อลื่น. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : ศึกษานุกูลการพิมพ์ .

ปราโมทย์ ไชยเวช และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2543. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย, ฝ่ายวิจัยเชื้อเพลิงและหล่อลื่น. 2553. PTT Performa Super Synthetic. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: www.pttplc.com [2553, มีนาคม 13]

พนิดา เทพขุน, อมรรัตน์ สื่อมโนธรรม, ยุทธนา ฐานมงคล และ กษมา เพชรทับทิม. 2549. รอบรู้... เรื่องราว ไบโอดีเซล. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : พิมพ์พินิจ การพิมพ์.

พิรัฐพล ตนานนท์. 2544. การบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันโดยใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ดินในแนวนอน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รติกร อลงกรณ์โชติกุล. 2549. ไบโอดีเซล. กลุ่มงานเชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม. กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กรม, วิชาการเกษตร. ปาล์มน้ำมัน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://it.doa.go.th/palm/linktechnical/re_clip_image004.gif. [2552, 28 พฤศจิกายน].

วุฒิวัฒ หล่อตระกูล. 2552. กระบวนการโคเอเลสเซอร์สำหรับบำบัดน้ำมันหล่อลื่นในน้ำเสียโดยเส้นใยสเตนเลสและเส้นใยสเตนเลสที่ปรับปรุงพื้นผิว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน,สำนักงาน, กระทรวงอุตสาหกรรม. 2540. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : กรม.

นโยบายปิโตรเลียมและปิโตรเคมี, สำนัก. 2553. รายละเอียดตารางราคาน้ำมันย้อนหลัง จากปี พ.ศ. 2539. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.eppo.go.th/retail_prices.html. [2553, กุมภาพันธ์ 12]

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, กระทรวงพลังงาน. 2553. สถานการณ์พลังงานไทย ปี 2552 และแนวโน้มปี 2553. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.eppo.go.th/Thaienergynews/NewsHighlight/shownewsdetail.aspx?NewsOID=4860&GroupOID=2&SubGroupOID=5&ObjectID=3. [2553, กุมภาพันธ์ 12]

สิริกุลกันยา พิพิธวัฒนาพันธุ์. 2549. การกำจัดโลหะหนักโดยเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อดุลยรัตน์ ตั้งทวี. 2552. น้ำมันปาล์ม : พลังงานทดแทนความหวังเกษตรกรไทย. [ออนไลน์] แหล่งที่มา : http://www.forest.go.th/state/link/knowledge/004forest.pdf. [2552, ตุลาคม 30].

อรทัย ชวาลภาฤทธิ์. 2545. คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.

ภาษาอังกฤษ

Amaralikit, T. 2004. Separation of Crude Palm Oil Dispersion in Water By Coalescence Media. Master's Thesis, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

Aurelle, Y. 1985. Treatment of Oil-Containing Wastewater. Bangkok. Department of Sanitary Engineering, Chulalongkorn University.

Briscoe, B.J., Luckham, P.F., Jayarajah, J.N. and Akeju, T. 2000. Separation of emulsion using fibrous fabric. Colloids and Surfaces. 163 : 151-164.

Bunyen, D. 2006. Demulsification Of Palm Oil In Water By Low Electric Fields. Master's Thesis, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

Dulsamphan, C. 1999. Survey of water quality in Klong Lad Phrao. Rajabhat Institutes research results in local development Office of Rajabhat Institutes Council Bangkok. : 584-592

Giuseppe, A. 2010. Comparative trials and an empirical model to assess throughput indices in olive oil extraction by decanter centrifuge. Journal of Food Engineering 97 : 48-56.

Gvirtzman, H. and Gorelick, S.M. 1992. The Concept of In-Situ Vapor Stripping for Removing VOCs from Groundwater. Porous Media. 8:71-92.

Ito, H., Hayashi, H. and Sasaki, H. 2002. Rapid separation of Oil Praticle from Low-concentrated O/W Emulsions in the Presence of Anion Surfactants Using Fibrous Slag. Journal of colloid and Interface Science 252 : 214-221.

Jaruwat, P., Kongjao, S. and Hunsom, K. 2010. Management of biodiesel wastewater by combined process of chemical recovery and electrochemical treatment. Energy Conversion and Management 51 : 531-537.

Ji, F., Li, C., Dong, X., Li, Y. And Wang, D. 2009. separation of oil from oily wastewater by sorption and coalescence technique using ethanol grafted polyacrylonitrila. Journal of Hazadous Materials 164 : 1346-1351.

Li, J. and Gu, Y. 2005. Coalescence of oil-in-water emulsion in fibrous and granular beds. Separation and Purification Technology. 42 : 1-13.

Maiti, S., Mishra, I., Bhattacharya, S. and Joshi, J. 2010. Removal of oil from oil-in-water emulsion using a packed of commercial resin. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspect. 312: 166-171.

Metcalf and Eddy. 2004. Wastewater Engineering : Treatment and Reuse. Singapore : McGrawHill.

Mohameed, F.S., Khater, W.A. and Mostafa, M.R. 2006. Characterization phenol sorptive properties of carbon activated by sulphuric acid. Chemical engineering journal. 116 : 47-52.

Radmila, M., Sokolovic, S., Govedarica, D.D. and Sokolovic, D.S. 2010. Separation of oil-in-water emulsion using two coalescers of different geometry. Journal of Hazadous Materials 175 : 1001-1006.

Shin, C. 2006. Filtration application from recycled expanded polystyrene. Journal of collois and Interface Science. 302 : 267-271.

Srinivasan, A. and Viraraghavan, T. 2008. Removal of oil by walnut shell media. Bioresource Technology. 99 : 8217-8220.

Wiwattanangkul, K. 2005. Continuous Demulsification of Crude Plam Oil in Water Using Fiber Coalescer. Master's Thesis, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

Zhou, Y.B., Chen, L., Hu, X.M. and Lu, J. 2008. Modified Resin Coalescer for Oil in Water emulsion Treatment: Effect of Operation Conditions on Oil Removal Performance. Industrial and Engineering Chemistry Research. 48: 1660-1664.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มโดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง

ภาคผนวก ก.1 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	109.0033	109.0305	0.0272	906.6667	863.3333
	111.9318	111.9564	0.0246	820.0000	
0.5 hour	110.4036	110.4215	0.0179	596.6667	521.6667
	113.8928	113.9062	0.0134	446.6667	
1 hour	113.0968	113.1167	0.0199	663.3333	585.0000
	127.1503	127.1655	0.0152	506.6667	
1.5 hour	126.9483	126.9643	0.0160	533.3333	550.0000
	110.1795	110.1965	0.0170	566.6667	
2 hour	112.8458	112.8655	0.0197	656.6667	680.0000
	112.7089	112.7300	0.0211	703.3333	
2.5 hour	96.8108	96.8303	0.0195	650.0000	555.0000
	124.7018	124.7156	0.0138	460.0000	
3 hour	126.129	126.1484	0.0194	646.6667	596.6667
	123.0667	123.0831	0.0164	546.6667	
3.5 hour	107.5643	107.58	0.0157	523.3333	600.0000
	111.901	111.9213	0.0203	676.6667	
4 hour	111.082	111.0946	0.0126	420.0000	495.0000
	109.8761	109.8932	0.0171	570.0000	
5 hour	111.3018	111.3135	0.0117	390.0000	431.6667
	108.8104	108.8246	0.0142	473.3333	
6 hour	110.0778	110.0932	0.0154	513.3333	520.0000
	110.0966	110.1124	0.0158	526.6667	
7 hour	110.1348	110.1495	0.0147	490.0000	531.6667
	109.946	109.9632	0.0172	573.3333	
8 hour	112.4594	112.4789	0.0195	650.0000	578.3333
	110.8743	110.8895	0.0152	506.6667	

ภาคผนวก ก.2 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	109.0033	109.0189	0.0156	520.0000	460.0000
	111.9318	111.9438	0.0120	400.0000	
0.5 hour	110.4048	110.4182	0.0134	446.6667	326.6667
	113.8928	113.899	0.0062	206.6667	
1 hour	113.0985	113.1131	0.0146	486.6667	331.6667
	127.1531	127.1584	0.0053	176.6667	
1.5 hour	126.95	126.9557	0.0057	190.0000	215.0000
	110.1855	110.1927	0.0072	240.0000	
2 hour	112.8471	112.8564	0.0093	310.0000	335.0000
	112.7076	112.7184	0.0108	360.0000	
2.5 hour	96.8125	96.8196	0.0071	236.6667	255.0000
	124.7023	124.7105	0.0082	273.3333	
3 hour	126.1302	126.1386	0.0084	280.0000	238.3333
	123.0684	123.0743	0.0059	196.6667	
3.5 hour	107.5639	107.5776	0.0137	456.6667	360.0000
	111.8971	111.905	0.0079	263.3333	
4 hour	111.081	111.0926	0.0116	386.6667	385.0000
	109.8755	109.887	0.0115	383.3333	
5 hour	111.3002	111.3117	0.0115	383.3333	361.6667
	108.7983	108.8085	0.0102	340.0000	
6 hour	110.0772	110.0895	0.0123	410.0000	391.6667
	110.0978	110.109	0.0112	373.3333	
7 hour	110.1342	110.1472	0.0130	433.3333	383.3333
	109.9345	109.9445	0.0100	333.3333	
8 hour	112.4578	112.4632	0.0054	180.0000	280.0000
	110.8742	110.8856	0.0114	380.0000	

ภาคผนวก ก.3 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	109.003	109.02135	0.0181	601.6700	565.8350
	111.932	111.9477	0.0159	530.0000	
0.5 hour	110.405	110.41935	0.0145	485.0000	429.1650
	113.891	113.902	0.0112	373.3300	
1 hour	113.099	113.1106	0.0115	385.0000	343.3350
	127.151	127.1598	0.0091	301.6700	
1.5 hour	126.948	126.9585	0.0103	341.6700	323.3350
	110.176	110.1855	0.0092	305.0000	
2 hour	112.847	112.8590	0.0121	403.3300	390.8300
	112.709	112.7200	0.0113	378.3300	
2.5 hour	96.8116	96.8207	0.0091	303.3300	310.8300
	124.704	124.7138	0.0095	318.3300	
3 hour	126.131	126.14085	0.0103	341.6700	291.6700
	123.068	123.07475	0.0073	241.6700	
3.5 hour	107.563	107.5714	0.0086	286.6700	332.5000
	111.897	111.90865	0.0113	378.3300	
4 hour	111.079	111.08525	0.0067	225.0000	226.6650
	109.875	109.88215	0.0068	228.3300	
5 hour	111.299	111.3067	0.0078	260.0000	234.1650
	108.799	108.80555	0.0062	208.3300	
6 hour	110.076	110.08745	0.0115	385.0000	334.1650
	110.101	110.1093	0.0085	283.3300	
7 hour	110.138	110.14845	0.0103	341.6700	358.3350
	109.936	109.94675	0.0113	375.0000	
8 hour	112.456	112.46225	0.0062	205.0000	253.3350
	110.875	110.88415	0.0091	301.6700	

ภาคผนวก ก.4 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	110.399	110.426	0.0268	893.3333	910.0000
	113.887	113.9145	0.0278	926.6667	
0.5 hour	113.092	113.11	0.0181	603.3333	635.0000
	127.144	127.1642	0.0200	666.6667	
1 hour	126.941	126.9560	0.0146	486.6667	531.6667
	110.171	110.1885	0.0173	576.6667	
1.5 hour	112.842	112.8498	0.0077	256.6667	610.0000
	112.703	112.7319	0.0289	963.3333	
2 hour	96.8075	96.8300	0.0225	750.0000	581.6650
	124.698	124.7101	0.0124	413.3300	
2.5 hour	126.126	126.1395	0.0137	456.6700	576.6700
	123.06	123.0810	0.0209	696.6700	
3 hour	107.558	107.5815	0.0235	783.3333	745.0017
	111.893	111.9142	0.0212	706.6700	
3.5 hour	111.076	111.0953	0.0197	656.6700	390.0000
	109.874	109.8774	0.0037	123.3300	
4 hour	111.297	111.3159	0.0190	633.3300	618.3300
	108.797	108.8152	0.0181	603.3300	
5 hour	110.076	110.0955	0.0200	666.6700	556.6700
	110.096	110.1092	0.0134	446.6700	
6 hour	110.134	110.1545	0.0203	676.6700	671.6700
	109.938	109.9575	0.0200	666.6700	
7 hour	112.454	112.4746	0.0205	683.3360	665.0030
	110.875	110.8948	0.0194	646.6700	
8 hour	111.771	111.7922	0.0209	696.6700	481.6700
	110.756	110.7642	0.0080	266.6700	

ภาคผนวก ก.5 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	110.399	110.4285	0.0293	976.6667	951.6667
	113.887	113.9145	0.0278	926.6667	
0.5 hour	110.4	110.4268	0.0272	906.6667	843.3333
	113.887	113.9102	0.0234	780.0000	
1 hour	113.093	113.1158	0.0230	766.6667	740.0000
	127.147	127.1680	0.0214	713.3333	
1.5 hour	126.944	126.9574	0.0137	456.6667	545.0000
	110.172	110.1912	0.0190	633.3333	
2 hour	112.844	112.8679	0.0235	783.3333	805.0000
	112.704	112.7288	0.0248	826.6667	
2.5 hour	96.8072	96.8247	0.0175	583.3333	708.3333
	124.699	124.7236	0.0250	833.3333	
3 hour	126.125	126.1485	0.0238	793.3333	686.6667
	123.062	123.0789	0.0174	580.0000	
3.5 hour	107.562	107.5803	0.0183	610.0000	665.0000
	111.909	111.931	0.0216	720.0000	
4 hour	111.077	111.101	0.0236	786.6667	676.6667
	109.875	109.892	0.0170	566.6667	
5 hour	111.298	111.3192	0.0214	713.3333	800.0000
	108.799	108.8257	0.0266	886.6667	
6 hour	110.075	110.1007	0.0260	866.6667	786.6667
	110.095	110.1158	0.0212	706.6667	
7 hour	110.134	110.1564	0.0227	756.6667	710.0000
	109.933	109.9527	0.0199	663.3333	
8 hour	112.453	112.4701	0.0170	566.6667	616.6667
	110.874	110.8943	0.0200	666.6667	

ภาคผนวก ก.6 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	110.399	110.4285	0.0293	976.6667	951.6667
	113.887	113.9145	0.0278	926.6667	
0.5 hour	110.398	110.4234	0.0257	856.6667	791.6667
	113.886	113.9078	0.0218	726.6667	
1 hour	113.092	113.1165	0.0243	810.0000	788.3333
	127.146	127.1689	0.0230	766.6667	
1.5 hour	126.943	126.9687	0.0259	863.3333	810.0000
	110.171	110.1939	0.0227	756.6667	
2 hour	112.842	112.8630	0.0206	686.6667	721.6667
	112.702	112.7245	0.0227	756.6667	
2.5 hour	96.808	96.8347	0.0267	890.0000	793.3333
	124.697	124.7178	0.0209	696.6667	
3 hour	126.125	126.1489	0.0244	813.3333	713.8333
	123.06	123.0789	0.0184	614.3333	
3.5 hour	107.557	107.5847	0.0273	910.0000	845.0000
	111.892	111.9158	0.0234	780.0000	
4 hour	111.076	111.0965	0.0205	683.3333	665.0000
	109.873	109.8921	0.0194	646.6667	
5 hour	111.297	111.3147	0.0175	583.3333	648.3333
	108.797	108.8181	0.0214	713.3333	
6 hour	110.078	110.0987	0.0204	680.0000	598.3333
	110.095	110.11	0.0155	516.6667	
7 hour	110.137	110.1592	0.0226	753.3333	791.6667
	109.932	109.9567	0.0249	830.0000	
8 hour	112.455	112.4751	0.0205	683.3333	823.3333
	110.872	110.9005	0.0289	963.3333	

ภาคผนวก ก.7 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	110.402	110.4529	0.0508	1692.0000	1623.0000
	113.891	113.9374	0.0466	1554.0000	
0.5 hour	110.401	110.4473	0.0459	1530.0000	1476.0000
	113.89	113.9329	0.0427	1422.0000	
1 hour	113.096	113.1446	0.0486	1620.0000	1470.0000
	127.149	127.1887	0.0396	1320.0000	
1.5 hour	126.947	126.9877	0.0405	1350.0000	1179.0000
	110.176	110.2065	0.0302	1008.0000	
2 hour	112.848	112.8894	0.0419	1398.0000	1227.0000
	112.709	112.7402	0.0317	1056.0000	
2.5 hour	96.8124	96.8477	0.0353	1176.0000	1308.0000
	124.705	124.7486	0.0432	1440.0000	
3 hour	126.132	126.1581	0.0265	882.0000	930.0000
	123.067	123.0965	0.0293	978.0000	
3.5 hour	107.563	107.5959	0.0326	1086.0000	1119.0000
	111.898	111.9321	0.0346	1152.0000	
4 hour	111.081	111.112	0.0310	1032.0000	963.0000
	109.878	109.9043	0.0268	894.0000	
5 hour	111.302	111.3332	0.0315	1050.0000	1209.0000
	108.802	108.8426	0.0410	1368.0000	
6 hour	110.075	110.1119	0.0369	1230.0000	1077.0000
	110.098	110.1254	0.0277	924.0000	
7 hour	110.133	110.1629	0.0301	1002.0000	984.0000
	109.934	109.9629	0.0290	966.0000	
8 hour	112.455	112.4837	0.0284	948.0000	960.0000
	110.877	110.9065	0.0292	972.0000	

ภาคผนวก ก.8 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	110.404	110.445	0.0414	1380.0000	1420.0000
	113.893	113.9365	0.0438	1460.0000	
0.5 hour	113.096	113.1196	0.0240	800.0000	761.6667
	127.152	127.1734	0.0217	723.3333	
1 hour	126.95	126.9735	0.0238	793.3333	868.3333
	110.181	110.2097	0.0283	943.3333	
1.5 hour	112.847	112.8756	0.0285	950.0000	898.3333
	112.712	112.7376	0.0254	846.6667	
2 hour	96.8117	96.8376	0.0259	863.3333	836.6667
	124.702	124.7263	0.0243	810.0000	
2.5 hour	126.13	126.1546	0.0246	820.0000	743.3333
	123.067	123.0865	0.0200	666.6667	
3 hour	107.562	107.5837	0.0217	723.3333	748.3333
	111.896	111.9189	0.0232	773.3333	
3.5 hour	111.08	111.1012	0.0217	723.3333	653.3333
	109.875	109.8928	0.0175	583.3333	
4 hour	111.3	111.3235	0.0232	773.3333	841.6667
	108.8	108.8276	0.0273	910.0000	
5 hour	110.077	110.1	0.0231	770.0000	685.0000
	110.099	110.1165	0.0180	600.0000	
6 hour	110.138	110.1546	0.0165	550.0000	680.0000
	109.941	109.9648	0.0243	810.0000	
7 hour	112.459	112.4751	0.0159	530.0000	518.3333
	110.876	110.8916	0.0152	506.6667	
8 hour	111.778	111.8013	0.0238	793.3333	813.3333
	110.759	110.7843	0.0250	833.3333	

ภาคผนวก ก.9 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลางตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	109.0033	109.0189	0.0156	520.0000	460.0000
	111.9318	111.9438	0.0120	400.0000	
0.5 hour	110.4048	110.4182	0.0134	446.6667	326.6667
	113.8928	113.899	0.0062	206.6667	
1 hour	113.0985	113.1131	0.0146	486.6667	331.6667
	127.1531	127.1584	0.0053	176.6667	
1.5 hour	126.95	126.9557	0.0057	190.0000	215.0000
	110.1855	110.1927	0.0072	240.0000	
2 hour	112.8471	112.8564	0.0093	310.0000	335.0000
	112.7076	112.7184	0.0108	360.0000	
2.5 hour	96.8125	96.8196	0.0071	236.6667	255.0000
	124.7023	124.7105	0.0082	273.3333	
3 hour	126.1302	126.1386	0.0084	280.0000	238.3333
	123.0684	123.0743	0.0059	196.6667	
3.5 hour	107.5639	107.5776	0.0137	456.6667	360.0000
	111.8971	111.905	0.0079	263.3333	
4 hour	111.081	111.0926	0.0116	386.6667	385.0000
	109.8755	109.887	0.0115	383.3333	
5 hour	111.3002	111.3117	0.0115	383.3333	361.6667
	108.7983	108.8085	0.0102	340.0000	
6 hour	110.0772	110.0895	0.0123	410.0000	391.6667
	110.0978	110.109	0.0112	373.3333	
7 hour	110.1342	110.1472	0.0130	433.3333	383.3333
	109.9345	109.9445	0.0100	333.3333	
8 hour	112.4578	112.4632	0.0054	180.0000	280.0000
	110.8742	110.8856	0.0114	380.0000	

ภาคผนวก ข

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มด้วยโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ภาคผนวก ข.1 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	110.4008	110.4154	0.0146	486.6667	428.3333
	113.8886	113.8997	0.0111	370.0000	
0.5 hour	113.0956	113.105	0.0094	313.3333	336.6667
	127.1486	127.1594	0.0108	360.0000	
1 hour	126.9472	126.9571	0.0099	330.0000	316.6667
	110.1765	110.1856	0.0091	303.3333	
1.5 hour	112.8405	112.8510	0.0105	350.0000	370.0000
	112.701	112.7127	0.0117	390.0000	
2 hour	96.8054	96.8122	0.0068	226.6667	345.0000
	124.6968	124.7107	0.0139	463.3333	
2.5 hour	126.1252	126.1350	0.0098	326.6667	355.0000
	123.0599	123.0714	0.0115	383.3333	
3 hour	107.5627	107.5718	0.0091	303.3333	310.0000
	111.8963	111.9058	0.0095	316.6667	
3.5 hour	111.0813	111.0883	0.0070	233.3333	261.6667
	109.8761	109.8848	0.0087	290.0000	
4 hour	111.3059	111.3142	0.0083	276.6667	288.3333
	108.8001	108.8091	0.0090	300.0000	
5 hour	110.0743	110.0834	0.0091	303.3333	295.0000
	110.0968	110.1054	0.0086	286.6667	
6 hour	110.133	110.142	0.0090	300.0000	283.3333
	109.9348	109.9428	0.0080	266.6667	
7 hour	112.456	112.4666	0.0106	353.3333	323.3333
	110.8776	110.8864	0.0088	293.3333	
8 hour	111.7744	111.7846	0.0102	340.0000	305.0000
	110.7569	110.765	0.0081	270.0000	

ภาคผนวก ข.2 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	110.406	110.4174	0.0115	383.3333	440.0000
	113.887	113.9021	0.0149	496.6667	
0.5 hour	113.093	113.1053	0.0119	396.6667	280.0000
	127.153	127.1577	0.0049	163.3333	
1 hour	126.946	126.9552	0.0095	316.6667	283.3333
	110.176	110.1836	0.0075	250.0000	
1.5 hour	112.849	112.8564	0.0078	260.0000	263.3333
	112.709	112.7167	0.0080	266.6667	
2 hour	96.8088	96.8162	0.0074	246.6667	250.0000
	124.702	124.7091	0.0076	253.3333	
2.5 hour	126.131	126.1380	0.0070	233.3333	238.3333
	123.067	123.0741	0.0073	243.3333	
3 hour	107.563	107.5705	0.0073	243.3333	221.6667
	111.9	111.9055	0.0060	200.0000	
3.5 hour	111.081	111.0892	0.0079	263.3333	216.6667
	109.878	109.8833	0.0051	170.0000	
4 hour	111.302	111.3075	0.0054	180.0000	176.6667
	108.8	108.8055	0.0052	173.3333	
5 hour	107.563	107.5685	0.0058	193.3333	176.6667
	111.9	111.9043	0.0048	160.0000	
6 hour	124.703	124.7079	0.0046	153.3333	156.6667
	126.131	126.1353	0.0048	160.0000	
7 hour	112.846	112.852	0.0060	200.0000	166.6667
	112.706	112.71	0.0040	133.3333	
8 hour	127.151	127.1552	0.0045	150.0000	153.3333
	126.949	126.9538	0.0047	156.6667	
9 hour	110.406	110.4107	0.0044	146.6667	158.3333
	113.893	113.8979	0.0051	170.0000	

ภาคผนวก ข.3 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	110.074	110.0851	0.0112	373.3333	355.0000
	110.096	110.1065	0.0101	336.6667	
0.5 hour	111.082	111.0889	0.0071	236.6667	211.6667
	111.306	111.3117	0.0056	186.6667	
1 hour	123.065	123.0729	0.0079	263.3333	276.6667
	107.563	107.5715	0.0087	290.0000	
1.5 hour	96.8088	96.8140	0.0052	173.3333	240.0000
	126.129	126.1383	0.0092	306.6667	
2 hour	110.176	110.1841	0.0085	283.3333	266.6667
	112.709	112.7164	0.0075	250.0000	
2.5 hour	113.093	113.1000	0.0067	223.3333	210.0000
	127.149	127.1548	0.0059	196.6667	
3 Hour	110.399	110.4063	0.0076	253.3333	280.0000
	113.887	113.8959	0.0092	306.6667	
3.5 hour	110.077	110.0838	0.0068	226.6667	326.6667
	110.096	110.1092	0.0128	426.6667	
4 hour	109.875	109.8833	0.0084	280.0000	290.0000
	111.302	111.3111	0.0090	300.0000	
5 hour	107.563	107.572	0.0088	293.3333	278.3333
	111.897	111.9052	0.0079	263.3333	
6 Hour	126.127	126.1363	0.0090	300.0000	240.0000
	123.068	123.0733	0.0054	180.0000	
7 hour	112.845	112.8532	0.0087	290.0000	261.6667
	96.8087	96.8157	0.0070	233.3333	
8 hour	127.147	127.1556	0.0084	280.0000	336.6667
	110.175	110.1868	0.0118	393.3333	

ภาคผนวก ข.4 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	110.3954	110.416	0.0206	686.667	676.6667
	113.09	113.11	0.02	666.667	
0.5 hour	127.15	127.1544	0.0044	146.667	145.0000
	96.8102	96.8145	0.0043	143.333	
1 hour	112.847	112.8547	0.0077	256.667	323.3333
	112.7075	112.7192	0.0117	390.000	
1.5 hour	124.7013	124.7072	0.0059	196.667	175.0000
	126.1285	126.1331	0.0046	153.333	
2 hour	113.8813	113.8877	0.0064	213.333	215.0000
	113.0874	113.0939	0.0065	216.667	
2.5 hour	126.9417	126.9491	0.0074	246.667	263.3333
	110.1706	110.179	0.0084	280.000	
3 hour	107.5603	107.5651	0.0048	160.000	130.0000
	111.8941	111.8971	0.003	100.000	
3.5 hour	112.7011	112.7053	0.0042	140.000	83.3333
	123.0632	123.064	0.0008	26.667	
4 hour	127.1483	127.152	0.0037	123.333	93.3333
	126.1273	126.1292	0.0019	63.333	
5 hour	111.8941	111.8964	0.0023	76.667	75.0000
	111.0808	111.083	0.0022	73.333	
6 hour	110.3991	110.4039	0.0048	160.000	128.3333
	113.0944	113.0973	0.0029	96.667	
7 hour	112.7074	112.7098	0.0024	80.000	71.6667
	110.1785	110.1804	0.0019	63.333	
8 hour	127.1485	127.1517	0.0032	106.667	70.0000
	126.9465	126.9475	0.001	33.333	

ภาคผนวก ข.5 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	113.881	113.9003	0.0190	633.3333	683.3333
	113.087	113.109	0.0220	733.3333	
0.5 hour	112.841	112.8542	0.0134	446.6667	441.6667
	112.702	112.7151	0.0131	436.6667	
1 hour	107.562	107.5724	0.0100	333.3333	263.3333
	111.897	111.9026	0.0058	193.3333	
1.5 hour	123.064	123.0711	0.0069	229.1667	295.0000
	107.562	107.5724	0.0108	360.8333	
2 hour	109.874	109.8830	0.0089	296.6667	248.3333
	111.301	111.3067	0.0060	200.0000	
2.5 hour	107.565	107.5720	0.0075	250.0000	243.3333
	111.082	111.0894	0.0071	236.6667	
3 hour	110.095	110.1021	0.0068	226.6667	220.0000
	110.133	110.1391	0.0064	213.3333	
3.5 hour	109.933	109.9393	0.0063	210.0000	223.3333
	112.454	112.4614	0.0071	236.6667	
4 hour	111.897	111.9033	0.0060	200.0000	130.0000
	111.081	111.0832	0.0018	60.0000	
5 hour	109.872	109.8761	0.0040	133.3333	138.3333
	111.299	111.3036	0.0043	143.3333	
6 hour	112.458	112.4624	0.0044	146.6667	178.3333
	110.878	110.884	0.0063	210.0000	
7 hour	111.304	111.3065	0.0030	100.0000	108.3333
	108.796	108.7994	0.0035	116.6667	
8 hour	110.097	110.1001	0.0029	96.6667	111.6667
	123.066	123.0697	0.0038	126.6667	

ภาคผนวก ข.6 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 Hour	110.078	110.104	0.0259	863.3300	658.3300
	110.094	110.1074	0.0136	453.3300	
0.5 hour	111.078	111.093	0.0153	510.0000	478.3333
	109.872	109.8849	0.0134	446.6667	
1 hour	123.06	123.0749	0.0148	493.3333	448.3333
	111.895	111.9072	0.0121	403.3333	
1.5 hour	96.8041	96.8160	0.0119	396.6667	390.0000
	126.125	126.1365	0.0115	383.3333	
2 Hour	112.839	112.8540	0.0150	500.0000	456.6667
	112.7	112.7127	0.0124	413.3333	
2.5 hour	113.094	113.1028	0.0086	286.6667	305.0000
	126.947	126.9563	0.0097	323.3333	
3 Hour	110.403	110.4087	0.0059	196.6667	233.3333
	113.89	113.8985	0.0081	270.0000	
3.5 hour	110.181	110.1873	0.0059	196.6667	196.6667
	127.148	127.1537	0.0059	196.6667	
4 hour	96.8109	96.816	0.0051	170.0000	193.3333
	112.846	112.8525	0.0065	216.6667	
5 hour	123.065	123.072	0.0066	220.0000	205.0000
	126.131	126.1363	0.0057	190.0000	
6 hour	111.078	111.0856	0.0079	263.3333	275.0000
	107.564	107.5722	0.0086	286.6667	
7 hour	108.793	108.8009	0.0075	250.0000	245.0000
	109.872	109.8787	0.0072	240.0000	
8 hour	110.131	110.1372	0.0064	213.3333	235.0000
	110.069	110.077	0.0077	256.6667	

ภาคผนวก ข.7 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	110.394	110.4307	0.0370	1233.3300	1283.3300
	113.881	113.9213	0.0400	1333.3300	
0.5 hour	113.093	113.11047	0.0171	569.0000	551.1650
	127.148	127.1639	0.0160	533.3300	
1 hour	126.944	126.9548	0.0113	378.0000	418.0000
	110.173	110.1871	0.0137	458.0000	
1.5 hour	112.841	112.8548	0.0143	478.0000	552.6650
	112.701	112.7198	0.0188	627.3300	
2 hour	96.8088	96.8291	0.0203	678.0000	561.6650
	124.7	124.7133	0.0134	445.3300	
2.5 hour	126.125	126.1419	0.0167	556.6700	520.0000
	123.06	123.0744	0.0145	483.3300	
3 hour	107.563	107.58007	0.0174	578.9700	601.2200
	111.896	111.915	0.0187	623.4700	
3.5 hour	111.081	111.09368	0.0124	412.5700	404.9500
	109.876	109.88802	0.0119	397.3300	
4 hour	111.306	111.31837	0.0125	415.5700	447.4200
	108.8	108.81448	0.0144	479.2700	
5 hour	110.074	110.08376	0.0095	315.2600	325.9650
	110.097	110.1069	0.0101	336.6700	
6 hour	110.133	110.14735	0.0143	478.3300	437.8900
	109.935	109.94672	0.0119	397.4500	
7 hour	112.456	112.46973	0.0137	457.7700	434.1700
	110.878	110.88992	0.0123	410.5700	
8 hour	111.774	111.78733	0.0133	444.4700	420.9000
	110.757	110.76882	0.0119	397.3300	

ภาคผนวก ข.8 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	110.397	110.4274	0.0306	1020.0000	1061.6667
	113.884	113.9168	0.0331	1103.3333	
0.5 hour	127.146	127.1623	0.0166	553.3333	571.6667
	126.943	126.9603	0.0177	590.0000	
1 hour	112.708	112.7207	0.0127	423.3333	405.0000
	96.8009	96.8125	0.0116	386.6667	
1.5 hour	124.703	124.7153	0.0119	396.6667	390.0000
	123.06	123.0710	0.0115	383.3333	
2 hour	107.557	107.5680	0.0113	376.6667	350.0000
	111.892	111.9014	0.0097	323.3333	
2.5 hour	109.872	109.8801	0.0080	266.6667	275.0000
	108.796	108.8040	0.0085	283.3333	
3 hour	110.401	110.409	0.0082	273.3333	278.3333
	113.888	113.8964	0.0085	283.3333	
3.5 hour	127.149	127.1553	0.0062	206.6667	216.6667
	126.946	126.953	0.0068	226.6667	
4 hour	112.847	112.8533	0.0063	210.0000	231.6667
	112.707	112.715	0.0076	253.3333	
5 hour	124.704	124.7102	0.0061	203.3333	243.3333
	126.13	126.1386	0.0085	283.3333	
6 hour	107.562	107.5691	0.0074	246.6667	251.6667
	111.896	111.9032	0.0077	256.6667	
7 hour	110.077	110.0846	0.0074	246.6667	238.3333
	110.133	110.1396	0.0069	230.0000	
8 hour	111.302	111.3085	0.0070	233.3333	228.3333
	108.8	108.8063	0.0067	223.3333	

ภาคผนวก ข.9 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	108.7934	108.8304	0.0370	1233.3333	1283.3333
	110.0938	110.1338	0.0400	1333.3333	
0.5 hour	111.077	111.093	0.0160	533.3333	301.6667
	111.2993	111.3014	0.0021	70.0000	
1 hour	123.063	123.0738	0.0108	360.0000	316.6667
	111.8968	111.9050	0.0082	273.3333	
1.5 hour	96.8069	96.8167	0.0098	326.6667	348.3333
	126.126	126.1371	0.0111	370.0000	
2 hour	110.1762	110.1897	0.0135	450.0000	350.0000
	112.847	112.8545	0.0075	250.0000	
2.5 hour	113.0905	113.1072	0.0167	556.6667	520.0000
	127.145	127.1595	0.0145	483.3333	
3 hour	110.3956	110.4109	0.0153	510.0000	533.3333
	113.882	113.8987	0.0167	556.6667	
4 hour	110.0964	110.1073	0.0109	363.3333	348.3333
	110.1334	110.1434	0.0100	333.3333	
4.5 hour	109.8776	109.8857	0.0081	270.0000	273.3333
	111.302	111.3103	0.0083	276.6667	
5 hour	111.8973	111.9091	0.0118	393.3333	365.0000
	111.081	111.0911	0.0101	336.6667	
6 hour	124.6979	124.7109	0.0130	433.3333	406.6667
	126.13	126.1414	0.0114	380.0000	
7 hour	112.8442	112.8568	0.0126	420.0000	415.0000
	112.7062	112.7185	0.0123	410.0000	
8 hour	126.9451	126.9542	0.0091	303.3333	390.0000
	110.1722	110.1865	0.0143	476.6667	

ภาคผนวก ค

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลโดยระบบโคเอเลสเซอร์
ที่ไม่มีตัวกลาง

ภาคผนวก ค.1 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	111.777	111.7985	0.0219	730.0000	630.0000
	110.76	110.776	0.0159	530.0000	
0.5 hour	110.406	110.423	0.0170	566.6667	436.6667
	113.895	113.9043	0.0092	306.6667	
1 hour	113.105	113.1210	0.0161	536.6667	496.6667
	127.154	127.1675	0.0137	456.6667	
1.5 hour	126.951	126.9596	0.0086	286.6667	330.0000
	110.185	110.1957	0.0112	373.3333	
2 hour	112.851	112.8611	0.0104	346.6667	456.6667
	112.712	112.7290	0.0170	566.6667	
2.5 hour	96.8137	96.8285	0.0148	493.3333	408.3333
	124.706	124.7153	0.0097	323.3333	
3 hour	126.133	126.1441	0.0108	360.0000	231.6667
	123.072	123.0751	0.0031	103.3333	
3.5 hour	107.566	107.5768	0.0111	370.0000	356.6667
	111.901	111.9111	0.0103	343.3333	
4 hour	111.081	111.0979	0.0165	550.0000	510.0000
	109.876	109.8902	0.0141	470.0000	
5 hour	111.303	111.3157	0.0131	436.6667	415.0000
	108.804	108.8157	0.0118	393.3333	
6 hour	110.076	110.0962	0.0200	666.6667	606.6667
	110.1	110.1168	0.0164	546.6667	
7 hour	110.135	110.1458	0.0104	346.6667	401.6667
	109.935	109.9488	0.0137	456.6667	
8 hour	112.459	112.4689	0.0104	346.6667	460.0000
	110.877	110.894	0.0172	573.3333	

ภาคผนวก ค.2 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	111.778	111.7931	0.0152	506.6667	588.3333
	110.761	110.7806	0.0201	670.0000	
0.5 hour	110.139	110.1509	0.0124	413.3333	503.3333
	109.935	109.9531	0.0178	593.3333	
1 hour	112.459	112.4754	0.0160	533.3333	520.0000
	110.879	110.8943	0.0152	506.6667	
1.5 hour	111.778	111.7935	0.0155	516.6667	528.3333
	110.759	110.7752	0.0162	540.0000	
2 hour	109	109.0174	0.0179	596.6667	636.6667
	111.931	111.9515	0.0203	676.6667	
2.5 hour	110.403	110.4212	0.0182	606.6667	466.6667
	113.895	113.9043	0.0098	326.6667	
3 hour	113.098	113.1186	0.0207	690.0000	626.6667
	127.152	127.1686	0.0169	563.3333	
3.5 hour	126.951	126.9627	0.0121	403.3333	436.6667
	110.179	110.1931	0.0141	470.0000	
4 hour	112.85	112.8608	0.0105	350.0000	480.0000
	112.707	112.7248	0.0183	610.0000	
5 hour	96.8131	96.8242	0.0111	370.0000	318.3333
	124.707	124.7148	0.0080	266.6667	
6 hour	126.132	126.1491	0.0170	566.6667	486.6667
	123.068	123.0802	0.0122	406.6667	
7 hour	107.562	107.5778	0.0158	526.6667	511.6667
	111.895	111.9102	0.0149	496.6667	
8 hour	111.081	111.0968	0.0158	526.6667	570.0000
	109.875	109.8937	0.0184	613.3333	

ภาคผนวก ค.3 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	111.777	111.7985	0.0219	730.0000	630.0000
	110.76	110.776	0.0159	530.0000	
0.5 hour	110.405	110.4176	0.0122	406.6667	460.0000
	113.894	113.9098	0.0154	513.3333	
1 hour	113.098	113.1148	0.0167	556.6667	466.6667
	127.153	127.1642	0.0113	376.6667	
1.5 hour	126.951	126.9641	0.0128	426.6667	328.3333
	110.184	110.1906	0.0069	230.0000	
2 hour	112.844	112.8627	0.0185	616.6667	580.0000
	112.709	112.7252	0.0163	543.3333	
2.5 hour	96.8122	96.8288	0.0166	553.3333	473.3333
	124.705	124.7169	0.0118	393.3333	
3 hour	126.131	126.1463	0.0154	513.3333	533.3333
	123.067	123.0836	0.0166	553.3333	
3.5 hour	107.565	107.5838	0.0189	630.0000	536.6667
	111.899	111.9123	0.0133	443.3333	
4 hour	111.083	111.0953	0.0123	410.0000	590.0000
	109.877	109.9	0.0231	770.0000	
5 hour	111.302	111.3162	0.0139	463.3333	541.6667
	108.801	108.8193	0.0186	620.0000	
6 hour	110.076	110.0889	0.0134	446.6667	455.0000
	110.099	110.1133	0.0139	463.3333	
7 hour	110.136	110.1494	0.0138	460.0000	415.0000
	109.936	109.9467	0.0111	370.0000	
8 hour	112.458	112.4667	0.0091	303.3333	293.3333
	110.878	110.8864	0.0085	283.3333	

ภาคผนวก ค.4 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	109.001	109.0361	0.0347	1156.6667	1046.6667
	111.936	111.9641	0.0281	936.6667	
0.5 hour	110.407	110.4246	0.0174	580.0000	540.0000
	113.896	113.9111	0.0150	500.0000	
1 hour	113.105	113.1214	0.0163	543.3333	545.0000
	127.156	127.1719	0.0164	546.6667	
1.5 hour	126.949	126.9703	0.0215	716.6667	683.3333
	110.181	110.2005	0.0195	650.0000	
2 hour	112.851	112.8770	0.0265	883.3333	751.6667
	112.71	112.7283	0.0186	620.0000	
2.5 hour	96.8145	96.8368	0.0223	743.3333	686.6667
	124.707	124.7261	0.0189	630.0000	
3 hour	126.133	126.1499	0.0173	576.6667	706.6667
	123.07	123.0952	0.0251	836.6667	
3.5 hour	107.565	107.5836	0.0187	623.3333	703.3333
	111.899	111.9225	0.0235	783.3333	
4 hour	111.086	111.1036	0.0180	600.0000	660.0000
	109.881	109.9024	0.0216	720.0000	
5 hour	111.304	111.327	0.0227	756.6667	725.0000
	108.801	108.8222	0.0208	693.3333	
6 hour	110.073	110.1027	0.0294	980.0000	946.6667
	110.099	110.1264	0.0274	913.3333	
7 hour	110.133	110.1558	0.0224	746.6667	845.0000
	109.934	109.962	0.0283	943.3333	
8 hour	112.458	112.4813	0.0238	793.3333	798.3333
	110.877	110.9011	0.0241	803.3333	

ภาคผนวก ค.5 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	109.001	109.0361	0.0347	1156.6667	1046.6667
	111.936	111.9641	0.0281	936.6667	
0.5 hour	111.302	111.3282	0.0262	873.3333	928.3333
	108.799	108.8285	0.0295	983.3333	
1 hour	110.074	110.1118	0.0383	1276.6667	1055.0000
	110.101	110.1256	0.0250	833.3333	
1.5 hour	110.137	110.1697	0.0331	1103.3333	1090.0000
	109.936	109.9681	0.0323	1076.6667	
2 hour	112.459	112.4940	0.0347	1156.6667	1178.3333
	110.878	110.9138	0.0360	1200.0000	
2.5 hour	111.777	111.8081	0.0309	1030.0000	858.3333
	110.759	110.7796	0.0206	686.6667	
3 hour	108.998	109.0351	0.0367	1223.3333	1150.0000
	111.932	111.9638	0.0323	1076.6667	
3.5 hour	110.401	110.4286	0.0276	920.0000	968.3333
	113.892	113.9226	0.0305	1016.6667	
4 hour	113.096	113.1238	0.0277	923.3333	856.6667
	127.152	127.176	0.0237	790.0000	
5 hour	126.949	126.9801	0.0316	1053.3333	960.0000
	110.178	110.2036	0.0260	866.6667	
6 hour	112.85	112.8705	0.0210	700.0000	780.0000
	112.709	112.7347	0.0258	860.0000	
7 hour	96.815	96.836	0.0210	700.0000	756.6667
	124.704	124.7287	0.0244	813.3333	
8 hour	126.132	126.1593	0.0277	923.3333	880.0000
	123.069	123.0939	0.0251	836.6667	

ภาคผนวก ค.6 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	109.001	109.0361	0.0347	1156.6667	1046.6667
	111.936	111.9641	0.0281	936.6667	
0.5 hour	111.778	111.8008	0.0230	766.6667	793.3333
	110.76	110.7846	0.0246	820.0000	
1 hour	109	109.0188	0.0192	640.0000	743.3333
	111.932	111.9573	0.0254	846.6667	
1.5 hour	110.404	110.4314	0.0270	900.0000	743.3333
	113.896	113.9135	0.0176	586.6667	
2 hour	113.102	113.1221	0.0204	680.0000	748.3333
	127.153	127.1777	0.0245	816.6667	
2.5 hour	126.954	126.9712	0.0171	570.0000	665.0000
	110.18	110.2027	0.0228	760.0000	
3 hour	112.851	112.8703	0.0193	643.3333	753.3333
	112.709	112.7346	0.0259	863.3333	
3.5 hour	96.8116	96.8383	0.0267	890.0000	783.3333
	124.707	124.7268	0.0203	676.6667	
4 hour	126.133	126.1576	0.0251	836.6667	780.0000
	123.07	123.0916	0.0217	723.3333	
5 hour	107.562	107.5972	0.0348	1160.0000	950.0000
	111.898	111.9204	0.0222	740.0000	
6 hour	111.083	111.1078	0.0246	820.0000	873.3333
	109.878	109.9055	0.0278	926.6667	
7 hour	111.303	111.3332	0.0305	1016.6667	985.0000
	108.8	108.8282	0.0286	953.3333	
8 hour	110.074	110.102	0.0284	946.6667	893.3333
	110.099	110.1246	0.0252	840.0000	

ภาคผนวก ค.7 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	109.009	109.0578	0.0489	1630.0000	1608.3333
	111.934	111.9812	0.0476	1586.6667	
0.5 hour	107.563	107.5956	0.0322	1073.3333	1133.3333
	111.898	111.9337	0.0358	1193.3333	
1 hour	111.086	111.1245	0.0382	1273.3333	1276.6667
	109.879	109.9176	0.0384	1280.0000	
1.5 hour	111.303	111.3366	0.0332	1106.6667	1198.3333
	108.8	108.8388	0.0387	1290.0000	
2 hour	110.074	110.1025	0.0289	963.3333	1010.0000
	110.099	110.1310	0.0317	1056.6667	
2.5 hour	110.135	110.1774	0.0428	1426.6667	1436.6667
	109.934	109.9775	0.0434	1446.6667	
3 hour	112.461	112.4939	0.0333	1110.0000	1096.6667
	110.879	110.9112	0.0325	1083.3333	
3.5 hour	111.774	111.8207	0.0472	1573.3333	1406.6667
	110.757	110.7939	0.0372	1240.0000	
4 hour	109.997	110.0419	0.0450	1500.0000	1341.6667
	111.932	111.9675	0.0355	1183.3333	
5 hour	110.403	110.4417	0.0392	1306.6667	1233.3333
	113.894	113.9286	0.0348	1160.0000	
6 hour	113.097	113.1307	0.0336	1120.0000	1128.3333
	127.155	127.1887	0.0341	1136.6667	
7 hour	126.949	126.9856	0.0363	1210.0000	1195.0000
	110.179	110.2142	0.0354	1180.0000	
8 hour	112.849	112.8858	0.0367	1223.3333	1276.6667
	112.71	112.7497	0.0399	1330.0000	

ภาคผนวก ค.8 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	109.009	109.0578	0.0489	1630.0000	1608.3333
	111.934	111.9812	0.0476	1586.6667	
0.5 hour	126.95	126.9805	0.0308	1026.6667	1070.0000
	110.177	110.2104	0.0334	1113.3333	
1 hour	112.849	112.8799	0.0312	1040.0000	1108.3333
	112.711	112.7459	0.0353	1176.6667	
1.5 hour	96.8106	96.8433	0.0327	1090.0000	1070.0000
	124.705	124.7365	0.0315	1050.0000	
2 hour	126.132	126.1636	0.0317	1056.6667	1046.6667
	123.07	123.1007	0.0311	1036.6667	
2.5 hour	107.563	107.5956	0.0331	1103.3333	1035.0000
	111.897	111.9264	0.0290	966.6667	
3 hour	111.082	111.1147	0.0329	1096.6667	1120.0000
	109.878	109.9121	0.0343	1143.3333	
3.5 hour	111.308	111.3354	0.0271	903.3333	961.6667
	108.799	108.8296	0.0306	1020.0000	
4 hour	110.071	110.1058	0.0345	1150.0000	1080.0000
	110.101	110.1314	0.0303	1010.0000	
5 hour	110.139	110.167	0.0285	950.0000	986.6667
	109.937	109.968	0.0307	1023.3333	
6 hour	112.456	112.4883	0.0325	1083.3333	1040.0000
	110.88	110.9097	0.0299	996.6667	
7 hour	111.775	111.8156	0.0404	1346.6667	1235.0000
	110.757	110.7911	0.0337	1123.3333	
8 hour	109	109.0296	0.0300	1000.0000	1150.0000
	111.931	111.9697	0.0390	1300.0000	

ภาคผนวก ค.9 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ไม่มีตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	109.009	109.0578	0.0489	1630.0000	1608.3333
	111.934	111.9812	0.0476	1586.6667	
0.5 hour	96.8141	96.8515	0.0374	1246.6667	1268.3333
	124.709	124.7474	0.0387	1290.0000	
1 hour	126.132	126.1741	0.0425	1416.6667	1310.0000
	123.071	123.1067	0.0361	1203.3333	
1.5 hour	107.563	107.6058	0.0427	1423.3333	1280.0000
	111.901	111.9355	0.0341	1136.6667	
2 hour	111.082	111.1208	0.0393	1310.0000	1323.3333
	109.878	109.9179	0.0401	1336.6667	
2.5 hour	111.307	111.3453	0.0388	1293.3333	1333.3333
	108.802	108.8431	0.0412	1373.3333	
3 hour	110.073	110.1208	0.0474	1580.0000	1398.3333
	110.1	110.1363	0.0365	1216.6667	
3.5 hour	110.138	110.1707	0.0324	1080.0000	998.3333
	109.935	109.9626	0.0275	916.6667	
4 hour	112.461	112.4957	0.0347	1156.6667	1293.3333
	110.881	110.924	0.0429	1430.0000	
5 hour	111.775	111.8231	0.0477	1590.0000	1645.0000
	110.757	110.8075	0.0510	1700.0000	
6 hour	108.999	109.0437	0.0448	1493.3333	1351.6667
	111.932	111.9685	0.0363	1210.0000	
7 hour	110.404	110.4417	0.0376	1253.3333	1305.0000
	113.893	113.9336	0.0407	1356.6667	
8 hour	113.107	113.1374	0.0302	1006.6667	1155.0000
	127.152	127.1914	0.0391	1303.3333	

ภาคผนวก ง

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลโดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ภาคผนวก ง.1 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	111.78	111.7914	0.0114	380.0000	625.0000
	110.758	110.7845	0.0261	870.0000	
0.5 hour	110.072	110.0901	0.0179	596.6700	591.6683
	110.098	110.116	0.0176	586.6667	
1 hour	110.135	110.1453	0.0102	340.0000	501.6667
	109.935	109.9545	0.0199	663.3333	
1.5 hour	112.456	112.4764	0.0200	666.6667	628.3333
	110.874	110.8920	0.0177	590.0000	
2 hour	111.783	111.7888	0.0054	180.0000	510.0000
	110.755	110.7804	0.0252	840.0000	
2.5 hour	109.004	109.0077	0.0036	120.0000	256.6667
	111.932	111.9436	0.0118	393.3333	
3 hour	110.401	110.4122	0.0110	366.6667	446.6667
	113.887	113.9025	0.0158	526.6667	
3.5 hour	113.092	113.1126	0.0209	696.6667	590.0000
	127.15	127.1647	0.0145	483.3333	
4 hour	126.949	126.9587	0.0097	323.3333	411.6667
	110.174	110.1894	0.0150	500.0000	
5 hour	112.848	112.8592	0.0108	360.0000	506.6667
	112.706	112.7252	0.0196	653.3333	
6 hour	96.8108	96.821	0.0102	340.0000	598.3333
	124.703	124.7288	0.0257	856.6667	
7 hour	126.132	126.1396	0.0079	263.3333	308.3333
	123.066	123.0763	0.0106	353.3333	
8 hour	107.558	107.5735	0.0155	516.6667	485.0000
	111.892	111.9059	0.0136	453.3333	

ภาคผนวก ง.2 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	110.758	110.7845	0.0261	870.0000	625.0000
	111.78	111.7914	0.0114	380.0000	
0.5 hour	112.847	112.8609	0.0143	476.6667	470.0000
	112.711	112.725	0.0139	463.3333	
1 hour	96.8096	96.8167	0.0071	236.6667	191.6667
	124.708	124.7119	0.0044	146.6667	
1.5 hour	126.132	126.1393	0.0077	256.6667	290.0000
	123.066	123.0757	0.0097	323.3333	
2 hour	107.562	107.5723	0.0103	343.3300	370.0000
	111.895	111.9067	0.0119	396.6700	
2.5 hour	111.081	111.0982	0.0174	580.0000	498.3333
	109.878	109.8901	0.0125	416.6667	
3 hour	111.298	111.3105	0.0126	420.0000	303.3333
	108.802	108.808	0.0056	186.6667	
3.5 hour	110.072	110.0821	0.0106	353.3333	260.0000
	110.103	110.1075	0.0050	166.6667	
4 hour	110.14	110.151	0.0111	370.0000	455.0000
	109.935	109.9507	0.0162	540.0000	
5 hour	112.457	112.4629	0.0060	200.0000	170.0000
	110.88	110.884	0.0042	140.0000	
6 hour	111.781	111.7812	0.0001	3.3333	155.0000
	110.758	110.767	0.0092	306.6667	
7 hour	108.998	109.0077	0.0098	392.0000	320.0000
	111.933	111.9395	0.0062	248.0000	
8 hour	108.998	109.0077	0.0098	326.6667	266.6667
	111.933	111.9395	0.0062	206.6667	

ภาคผนวก ง.3 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	111.78	111.7914	0.0114	380.0000	625.0000
	110.758	110.7845	0.0261	870.0000	
0.5 hour	111.076	111.0934	0.0175	583.3333	338.3333
	109.883	109.8862	0.0028	93.3333	
1 hour	111.302	111.3132	0.0112	373.3333	326.6667
	108.798	108.8060	0.0084	280.0000	
1.5 hour	110.071	110.0845	0.0133	443.3333	371.6667
	110.103	110.1115	0.0090	300.0000	
2 hour	110.138	110.1510	0.0126	420.0000	405.0000
	109.934	109.9457	0.0117	390.0000	
2.5 hour	112.457	112.4710	0.0143	476.6667	478.3333
	110.877	110.8914	0.0144	480.0000	
3 hour	111.78	111.7889	0.0094	313.3333	363.3333
	110.756	110.7684	0.0124	413.3333	
3.5 hour	109.001	109.0157	0.0148	493.3333	450.0000
	111.929	111.9415	0.0122	406.6667	
4 hour	110.406	110.4178	0.0120	400.0000	381.6667
	113.894	113.9047	0.0109	363.3333	
5 hour	113.099	113.1051	0.0064	213.3333	235.0000
	127.155	127.1622	0.0077	256.6667	
6 hour	126.952	126.9584	0.0068	226.6667	261.6667
	110.179	110.1876	0.0089	296.6667	
7 hour	112.846	112.8569	0.0110	366.6667	366.6667
	112.708	112.7192	0.0110	366.6667	
8 hour	96.8094	96.8195	0.0101	336.6667	336.6667
	124.704	124.7139	0.0101	336.6667	

ภาคผนวก ง.4 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	109	109.0369	0.0365	1216.6667	1130.0000
	111.931	111.962	0.0313	1043.3333	
0.5 hour	109.001	109.0347	0.0341	1136.6667	1086.6683
	111.931	111.9618	0.0311	1036.6700	
1 hour	110.399	110.4285	0.0295	983.3333	881.6667
	113.891	113.9143	0.0234	780.0000	
1.5 hour	113.096	113.1275	0.0319	1063.3333	985.0000
	127.152	127.1793	0.0272	906.6667	
2 hour	126.95	126.9752	0.0257	856.6667	863.3333
	110.176	110.2025	0.0261	870.0000	
2.5 hour	112.85	112.8705	0.0207	690.0000	740.0000
	112.707	112.7308	0.0237	790.0000	
3 hour	96.8095	96.8333	0.0238	793.3333	903.3333
	124.704	124.7342	0.0304	1013.3333	
3.5 hour	126.132	126.1534	0.0216	720.0000	705.0000
	123.069	123.0899	0.0207	690.0000	
4 hour	107.561	107.5885	0.0277	923.3333	735.0000
	111.898	111.9148	0.0164	546.6667	
5 hour	110.079	110.1058	0.0272	906.6667	923.3333
	109.878	109.9059	0.0282	940.0000	
6 hour	111.308	111.3352	0.0274	913.3333	706.6667
	108.803	108.8181	0.0150	500.0000	
7 hour	110.071	110.0948	0.0235	783.3333	781.6667
	110.099	110.1223	0.0234	780.0000	
8 hour	110.132	110.1595	0.0277	923.3333	733.3333
	109.935	109.9509	0.0163	543.3333	

ภาคผนวก ง.5 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	109	109.0369	0.0365	1216.6667	1130.0000
	111.931	111.962	0.0313	1043.3333	
0.5 hour	126.131	126.1495	0.0186	620.0000	640.0000
	123.067	123.0865	0.0198	660.0000	
1 hour	107.561	107.5825	0.0213	710.0000	643.3333
	111.896	111.9130	0.0173	576.6667	
1.5 hour	111.081	111.0969	0.0155	516.6667	1040.0000
	109.881	109.9282	0.0469	1563.3333	
2 hour	111.303	111.3202	0.0176	586.6667	631.6667
	108.798	108.8186	0.0203	676.6667	
2.5 hour	110.07	110.0980	0.0285	950.0000	711.6667
	110.102	110.1160	0.0142	473.3333	
3 hour	110.138	110.162	0.0243	810.0000	698.3333
	109.935	109.9521	0.0176	586.6667	
3.5 hour	112.455	112.4769	0.0223	743.3300	723.3300
	110.784	110.8053	0.0211	703.3300	
4 hour	111.779	111.8018	0.0228	760.0000	540.0000
	110.756	110.7659	0.0096	320.0000	
5 hour	108.998	109.0145	0.0162	540.0000	558.3333
	111.931	111.9478	0.0173	576.6667	
6 hour	110.403	110.4235	0.0208	693.3333	706.6667
	113.892	113.9134	0.0216	720.0000	
7 hour	113.095	113.1089	0.0139	556.0000	454.0000
	127.155	127.1636	0.0088	352.0000	
8 hour	126.947	126.9684	0.0219	730.0000	740.0000
	110.175	110.1974	0.0225	750.0000	

ภาคผนวก ง.6 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	109	109.0369	0.0365	1216.6667	1130.0000
	111.931	111.962	0.0313	1043.3333	
0.5 hour	112.464	112.4785	0.0142	473.3333	618.3333
	110.874	110.8973	0.0229	763.3333	
1 hour	111.78	111.8063	0.0266	886.6667	831.6667
	110.758	110.7816	0.0233	776.6667	
1.5 hour	108.999	109.0254	0.0264	880.0000	865.0000
	111.931	111.9568	0.0255	850.0000	
2 hour	110.403	110.4301	0.0275	916.6667	1003.3333
	113.89	113.9230	0.0327	1090.0000	
2.5 hour	113.093	113.1200	0.0270	900.0000	771.6667
	127.154	127.1737	0.0193	643.3333	
3 hour	126.947	126.9714	0.0241	803.3333	930.0000
	110.178	110.2098	0.0317	1056.6667	
3.5 hour	112.849	112.8724	0.0238	793.3333	781.6667
	112.71	112.7332	0.0231	770.0000	
4 hour	96.8109	96.8336	0.0227	756.6667	825.0000
	124.703	124.7298	0.0268	893.3333	
5 hour	126.132	126.1596	0.0280	933.3333	835.0000
	123.071	123.0928	0.0221	736.6667	
6 hour	107.561	107.5973	0.0361	1203.3333	1026.6667
	111.895	111.9207	0.0255	850.0000	
7 hour	111.081	111.1054	0.0249	830.0000	1078.3333
	109.878	109.9178	0.0398	1326.6667	
8 hour	111.309	111.3314	0.0226	753.3333	721.6667
	108.802	108.8226	0.0207	690.0000	

ภาคผนวก ง.7 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	111.779	111.828	0.0490	1633.3333	1768.3333
	110.758	110.8149	0.0571	1903.3333	
0.5 hour	110.404	110.4402	0.0359	1196.6667	1073.3333
	113.896	113.9242	0.0285	950.0000	
1 hour	113.099	113.1316	0.0329	1096.6667	1065.0000
	127.153	127.1836	0.0310	1033.3333	
1.5 hour	126.951	126.9824	0.0311	1036.6667	1110.0000
	110.176	110.2115	0.0355	1183.3333	
2 hour	112.852	112.8828	0.0310	1033.3333	1238.3333
	112.712	112.7554	0.0433	1443.3333	
2.5 hour	96.8123	96.8423	0.0300	1000.0000	955.0000
	124.707	124.7347	0.0273	910.0000	
3 hour	126.136	126.1706	0.0345	1150.0000	1098.3333
	123.07	123.1017	0.0314	1046.6667	
3.5 hour	107.565	107.5941	0.0294	980.0000	971.6667
	111.899	111.9276	0.0289	963.3333	
4 hour	111.08	111.1157	0.0357	1190.0000	1140.0000
	109.877	109.91	0.0327	1090.0000	
5 hour	111.311	111.3342	0.0232	773.3333	818.3333
	108.804	108.8295	0.0259	863.3333	
6 hour	110.073	110.1142	0.0409	1363.3333	1263.3333
	110.097	110.1322	0.0349	1163.3333	
7 hour	110.137	110.1731	0.0363	1210.0000	1326.6667
	109.937	109.9798	0.0433	1443.3333	
8 hour	112.46	112.4855	0.0257	856.6667	868.3333
	110.879	110.9055	0.0264	880.0000	

ภาคผนวก ง.8 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	109.009	109.0578	0.0489	1630.0000	1608.3333
	111.934	111.9812	0.0476	1586.6667	
0.5 hour	110.407	110.4318	0.0252	840.0000	945.0000
	113.892	113.9235	0.0315	1050.0000	
1 hour	113.105	113.1285	0.0233	776.6667	918.3333
	127.155	127.1863	0.0318	1060.0000	
1.5 hour	126.95	126.9856	0.0353	1176.6667	1150.0000
	110.178	110.2114	0.0337	1123.3333	
2 hour	112.849	112.8828	0.0343	1143.3333	1106.6667
	112.71	112.7421	0.0321	1070.0000	
2.5 hour	96.8094	96.8418	0.0324	1080.0000	1163.3333
	124.705	124.7424	0.0374	1246.6667	
3 hour	126.132	126.1674	0.0352	1173.3333	1161.6667
	123.068	123.1026	0.0345	1150.0000	
3.5 hour	107.564	107.5938	0.0301	1003.3333	1140.0000
	111.896	111.9341	0.0383	1276.6667	
4 hour	111.08	111.1188	0.0388	1293.3333	1201.6667
	109.88	109.9129	0.0333	1110.0000	
5 hour	111.301	111.3347	0.0340	1133.3333	1163.3333
	108.8	108.8358	0.0358	1193.3333	
6 hour	110.074	110.1071	0.0336	1120.0000	1035.0000
	110.098	110.1265	0.0285	950.0000	
7 hour	110.139	110.1693	0.0299	996.6667	975.0000
	109.934	109.9624	0.0286	953.3333	
8 hour	112.461	112.4843	0.0235	783.3333	946.6667
	110.879	110.9125	0.0333	1110.0000	

ภาคผนวก ง.9 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วการไหล 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที โดยระบบโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวกลาง

ชั่วโมงที่เก็บ	น้ำหนักภาชนะก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักภาชนะที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิกรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำมันเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
0 hour	111.779	111.828	0.0490	1633.3333	1768.3333
	110.758	110.8149	0.0571	1903.3333	
0.5 hour	110.401	110.4437	0.0426	1420.0000	1256.6667
	113.893	113.9258	0.0328	1093.3333	
1 hour	113.097	113.1379	0.0410	1366.6667	1173.3333
	127.155	127.1844	0.0294	980.0000	
1.5 hour	126.949	126.9801	0.0307	1023.3333	1130.0000
	110.176	110.2130	0.0371	1236.6667	
2 hour	112.848	112.8800	0.0320	1066.6667	1198.3333
	112.708	112.7478	0.0399	1330.0000	
2.5 hour	96.8084	96.8460	0.0376	1253.3333	1160.0000
	124.704	124.7358	0.0320	1066.6667	
3 hour	126.131	126.1603	0.0289	963.3333	1133.3333
	123.068	123.1067	0.0391	1303.3333	
3.5 hour	107.563	107.6037	0.0404	1346.6667	1326.6667
	111.895	111.9342	0.0392	1306.6667	
4 hour	111.078	111.1206	0.0427	1423.3333	811.6667
	109.882	109.8877	0.0060	200.0000	
5 hour	111.31	111.3352	0.0256	853.3333	1011.6667
	108.8	108.8355	0.0351	1170.0000	
6 hour	110.073	110.1103	0.0378	1260.0000	1176.6667
	110.097	110.1297	0.0328	1093.3333	
7 hour	110.137	110.1749	0.0377	1256.6667	1285.0000
	109.933	109.9719	0.0394	1313.3333	
8 hour	112.462	112.4873	0.0253	843.3333	1095.0000
	110.875	110.9156	0.0404	1346.6667	

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจิตรภณ โรจน์กิรติการ เกิดเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2525 สถานที่เกิดจังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สุขภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2548 และเข้าศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ.2554